

С.В.Соколов
О.С.Соколов
С.С.Антоненко

КОНТРОЛЬ І ВИМІРЮВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

СумДУ - 2020



Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

С. В. Соколов,
О. С. Соколов,
С. С. Антоненко

КОНТРОЛЬ І ВИМІРЮВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Конспект лекцій

Суми
Сумський державний університет
2020

Контроль і вимірювання в технологічних та енергетичних системах : конспект лекцій / укладачі: С. В. Соколов, О. С. Соколов, С. С. Антоненко. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 242 с.

Секція КСУ кафедри комп'ютерних наук
Кафедра прикладної гідроаеромеханіки

ЗМІСТ

	С.
Перелік умовних скорочень	8
ВСТУП.....	9
1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАННЯ	11
1.1 Метрологія – наука про вимірювання.....	11
1.2 Види і методи вимірювання	12
1.2.1 Види вимірювання.....	12
1.2.2 Методи вимірювання	13
1.3 Системи одиниць вимірювання.....	15
2 ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ.....	16
2.1 Класифікація похибок	16
2.2 Похибки засобів вимірювань. Клас точності.....	19
3 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИБОРІВ	22
3.1 Класифікація вимірювальних приборів.....	22
3.2 Основні властивості вимірювальних приборів.....	25
4 ТЕХНІКА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ	27
4.1 Первинні вимірювальні перетворювачі (датчики)	27
4.1.1 Ємнісні датчики.....	28
4.1.2 П'єзоелектричні перетворювачі.....	29
4.1.3 Електромагнітні перетворювачі.....	30
4.1.4 Фотоелектричні датчики.....	31
4.1.5 Резистивні, термоелектричні та іонні перетворювачі.....	32
4.2 Проміжні перетворювачі.....	32
4.2.1 Сельсінні передавальні перетворювачі	33
4.2.2 Диференційно-трансформаторні перетворювачі	35
4.2.3 Пневматичні перетворювачі.....	37
4.3 Вторинні прилади.....	38
4.3.1 Характеристика елементів вимірювальних приборів	38
4.3.2 Аналогові вторинні прилади	39
4.3.3 Цифрові прилади	43
4.4 Основні вимірювальні схеми вторинних приборів.....	45

5 ЗАКОНОДАВЧА МЕТРОЛОГІЯ	50
5.1 Забезпечення єдності та якості вимірювань	50
6 СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	53
6.1 Структура систем автоматичного контролю	53
6.2 Класифікація систем автоматичного контролю	54
7 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ	57
7.1 Класифікація приладів для вимірювання температури	57
7.2 Термометри розширення.....	57
7.2.1 Ртутні термометри.....	58
7.2.2 Дилатометричні термометри	59
7.3 Манометричні термометри	59
7.4 Термоелектричні термометри.....	61
7.5 Термометри опору	62
7.6 Пірометри	64
7.6.1 Оптичні пірометри	65
7.6.2 Кольорові пірометри	67
7.6.3 Радіаційні пірометри (повного випромінювання).....	69
7.7 Тепловізори	69
7.7.1 Принцип дії тепловізорів	71
7.7.2 Сфери застосування тепловізорів	72
8 ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ	74
8.1 Загальні положення та класифікація приладів	74
8.2 Рідинні засоби вимірювання тиску.....	76
8.2.1 Двотрубні манометри.....	77
8.2.2 Однотрубні манометри	78
8.2.3 Поплавкові манометри.....	79
8.2.4 Кільцеві прилади	79
8.2.5 Дзвонові прилади	82
8.3 Деформаційні прилади для вимірювання тиску	84
8.3.1 Прилади з трубчастими пружинами	85
8.3.2 Мембранні прилади.....	88
8.3.3 Пружинно-мембранні прилади	88
8.3.4 Сильфонні прилади	89

8.3.5 Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску прямого перетворення.....	91
9 ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИН	96
9.1 Загальні відомості та класифікація рівнемірів	96
9.2 Візуальні засоби вимірювання рівня	97
9.3 Поплавкові засоби вимірювання рівня.....	98
9.4 Буйкові засоби вимірювання рівня	99
9.5 Гідростатичні засоби вимірювання рівня	103
9.6 Електричні засоби вимірювання рівня	106
9.6.1 Ємнісні рівнеміри.....	106
9.6.2 Кондуктометричні сигналізатори рівня	107
9.7 Акустичні засоби вимірювання рівня.....	109
9.8 Радіоізотопні рівнеміри	110
10 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ТА КІЛЬКОСТІ РЕЧОВИНИ	113
10.1 Одиниці та методи вимірювання витрати й кількості речовини	113
10.2 Витратоміри змінного перепаду тиску	114
10.3 Витратоміри змінного рівня	118
10.4 Витратоміри постійного перепаду тиску	120
10.5 Електромагнітні (індукційні) витратоміри.....	122
10.6 Ультразвукові витратоміри	125
10.7 Швидкісні витратоміри та лічильники	130
10.7.1 Швидкісні лічильники рідини.....	130
10.7.2 Анемометри	133
10.8 Прилади для вимірювання об'єму речовини	134
10.8.1 Мірний бак	134
10.8.2 Об'ємні лічильники.....	135
10.9 Ваговий метод вимірювання витрати сипучих речовин	138
10.9.1 Автоматичні порційні ваги.....	138
10.9.2 Автоматичні конвеєрні ваги.....	142
10.10 Дозування твердих і рідких матеріалів.....	144
11 МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ СКЛАДУ МАТЕРІАЛІВ.....	153
11.1 Електрокондуктометричний метод аналізу.....	154

11.2 Потенціометричний метод аналізу.....	161
11.3 Абсорбційні методи спектрального аналізу	167
11.4 Інші непрямі методи аналізу.....	173
11.5 Хроматографічний метод аналізу складу газових сумішей.....	184
12 ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	
РІДИН І ГАЗІВ	187
12.1 Загальні відомості.....	187
12.2 Засоби вимірювання густини рідин і газів.....	188
12.2.1 Вагові (пікнометричні) денсиметри	188
12.2.2 Поплавкові (аерометричні) денсиметри.....	190
12.2.3 Гідростатичні (п'єзометричні) денсиметри	192
12.2.4 Радіоізотопні денсиметри	194
12.3 Засоби вимірювання в'язкості рідин	196
12.3.1 Капілярні віскозиметри (віскозиметри витікання) ..	197
12.3.2 Віскозиметри з падаючим тілом (кулькові віскозиметри)	198
12.3.3 Ротаційні віскозиметри	199
12.3.4 Вібраційні віскозиметри	202
12.4 Вологоміри для газів і твердих тіл.....	203
12.4.1 Психрометричний метод	204
12.4.2 Метод точки роси	206
12.4.3 Кондуктометричний метод.....	208
12.4.4 Метод діелектричної проникності (діелькометричний метод).....	209
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	210
ДОДАТОК А.....	211
ДОДАТОК Б	213
Б.1 Визначення дисперсії та середньоквадратичної похибки.....	213
Б.2 Графічна характеристика похибок.....	215
Б.3 Похибка середнього значення	222

Б.4. Похибка середнього значення, обумовлена малою кількістю вимірювань	225
Б.5 Інструментальна похибка	226
Б.6 Облік похибки і порядок виконання округлення в записі кінцевого результату вимірювання	230
Б.7 Похибки непрямих вимірювань	232
ДОДАТОК В.....	235
В.1 Сертифікація в Україні	235
В.2 Стандартизація в Україні	236
В.2.1 Результати та види стандартизації.....	236
В.2.2 Об'єкти та суб'єкти стандартизації	237
В.2.3 Мета і завдання стандартизації	238
В.2.4 Методичні основи стандартизації.....	239
В.2.5 Системи стандартів України.....	240

Перелік умовних скорочень

ISO – Міжнародна організація зі стандартизації
pH – концентрація іонів водню
SI – Міжнародна система стандартів
АЦП – аналогово-цифровий перетворювач
ГСТУ – галузевий стандарт України
Д – датчик
ДП – додатковий перетворювач
ДСТУ – державний стандарт України
ДТ – диференціально-трансформаторний
ЕОМ – електронна обчислювальна машина
ЕП – електронний підсилювач
ЕРС – електрорушійна сила
ЄСКД – єдина система конструкторської документації
ЄСТД – єдина система технологічної документації
ЄСТПВ – єдина система технологічної підготовки виробництва
КГ – контактна група
МКС – система одиниць: метр, кілограм-сила, секунда
ОВ – об'єкт вимірювання
П – приймач, перетворювач
ПВП – первинний вимірювальний перетворювач
РД – реверсивний двигун
СНТС – стандарт науково-технічних та інженерних товариств і спілок України
СОУ – стандарт організації України
СРПВ – система розроблення і впровадження продукції у виробництво
ССБП – система стандартів безпеки праці
ТП – термopapa
ТУ – технічні умови
ФЕ – фотоелемент
ЦВП – цифровий вимірювальний прилад
ЦОВМ – центральний орган виконавчої влади з питань стандартизації

ВСТУП

Автоматизація виробництва неможлива без якісної та надійної системи автоматичного контролю, що дозволяє одержувати інформацію про режимні параметри процесів, а також про параметри якості сировини, проміжних і кінцевих продуктів. Ефективність роботи системи автоматичного контролю багато в чому визначає ефективність роботи всієї автоматизованої системи керування технологічним процесом.

Місце вимірювальної техніки в сучасному світі можуть характеризувати такі дані: витрати на вимірювальну техніку становлять 10–15 % усіх матеріальних витрат на суспільне виробництво, а в таких галузях промисловості як нафтопереробна, нафтохімічна, хімічна, радіоелектронна ці витрати досягають 25 %.

Науковою основою систем автоматичного контролю є метрологія та фізичні принципи вимірювання параметрів технологічних процесів, а технічною базою цих систем є засоби вимірювань і перетворень відповідних параметрів. Зазначені технічні засоби, різні за складністю та принципами дії, називають вимірювальними пристроями, установками або системами.

Сукупність технічних засобів, що використовують для вимірювань, методів і прийомів вимірювань та інтерпретації їх результатів, прийнято визначати поняттям вимірювальна техніка.

Правильність вибору вимірювального приладу для проведення необхідних вимірювань для фахівця, який не займається їх створенням (інженер з автоматизації, інженер-енергетик, інженер-енергоменеджер тощо), буде ґрунтуватися лише на знаннях про їх принципи роботи і на конструктивному виконанні. Розуміння принципу роботи вимірювального приладу визначить максимальну точність вимірювання, а знання конструктивного виконання забезпечить правильну експлуатацію, що в сукупності дасть об'єктивне оцінювання стану обстежуваних енергетичних або технологічних систем.

У наведеному конспекті лекцій у скороченій формі викладені основні питання метрології: теорія визначення похибок, методи і засоби вимірювання, які набули поширення в

роботах щодо вимірювання та контролю за експлуатацією технологічних та енергетичних систем. Наведено основні експлуатаційні та конструктивні характеристики приладів вимірювання температури, тиску, витрати рідин і газів; вимірювання рівня рідин і сипучих матеріалів; контролю хімічного складу рідин газів; визначення фізичних величин густини і в'язкості рідин і газів, вологості газів та твердих тіл тощо.

Обсяг матеріалу цього конспекту лекцій є достатнім для одержання базових знань з курсу «Контроль і вимірювання в технологічних та енергетичних системах». Конспект лекцій призначений для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», а також може бути використаний для спеціальностей інженерно-енергетичного напрямку та як додатковий курс для всіх інженерних спеціальностей.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРЮВАННЯ

1.1 Метрологія – наука про вимірювання

Теоретичною основою вимірювальної техніки є *метрологія*.

Метрологія – наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення необхідної точності.

Сучасна метрологія охоплює велике коло питань, що включають: загальну теорію вимірювань, одиниці фізичних величин і їх системи, методи і засоби вимірювань, методи визначення точності вимірювань, основи забезпечення єдності вимірювань та одноманітності засобів вимірювань, методи передачі розмірів одиниць від еталонів або зразкових засобів вимірювань робочим засобам вимірювань.

Як і в будь-якій сфері знань, у метрології необхідно розрізняти теоретичні, технічні та організаційні аспекти (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Розділи метрології

Основою метрології є вимірювання експериментально визначених фізичних величин з використанням спеціальних технічних засобів.

У процесі вимірювання знаходять числове значення величини, тобто дізнаються, у скільки разів значення цієї величини більше або менше взятої за одиницю.

Результат вимірювання записують у вигляді рівняння

$$X = q \cdot x, \quad (1.1)$$

де X – вимірювальна величина;
 q – числове значення цієї величини;
 x – одиниця фізичної величини.

Цей вислів називають *основним рівнянням вимірювання*.

Поряд із вимірюванням існує поняття *контролю*. Метою контролю є з'ясування того, чи відповідають певні властивості випробуваного (контрольованого) об'єкта заданим вимогам, на основі цього ухвалюють відповідні рішення.

1.2 Види і методи вимірювання

1.2.1 Види вимірювання

У процесі виконання вимірювання, його аналізу необхідно знати, розуміти і застосовувати термінологію, яку використовують у сфері знань теорії вимірювання, що є показником високої кваліфікації інженера, який виконує вимірювальні роботи.

До основної термінології в теорії вимірювання належать визначення наведені у додатку А.

За умовами, що визначають точність результату, вимірювання фізичних величин поділяють на технічні (промислові), контрольно-перевірочні, вимірювання максимально можливої точності.

Вимірювання максимально можливої точності, що досягається за сучасного рівня техніки, пов'язані зі створенням і відтворенням еталонів, а також вимірювання універсальних фізичних констант.

Контрольно-перевірочні (лабораторні) вимірювання відрізняються високою точністю завдяки застосуванню більш досконалих методів і приладів для обліку можливих похибок. Цей вид вимірювань здійснюють під час виконання науково-дослідних, налагоджувальних і перевірочних робіт.

Технічні вимірювання мають порівняно невисоку точність, достатню для практичних цілей, і виробляються приладами, будова яких відповідає їх призначенню та умовам роботи.

За способом одержання результату всі вимірювання поділяють на прямі, непрямі, сукупні та спільні.

Вимірювання називають *прямим*, якщо шукане значення вимірюваного параметра визначають безпосереднім порівнянням його з одиницею вимірювання. Прикладом прямих вимірювань можуть бути: вимірювання довжини лінійкою, маси за допомогою ваг, температури скляним термометром.

Непрямими називають вимірювання, за якого шукане значення параметра обчислюють на підставі результатів прямих вимірювань інших величин, пов'язаних з ним однозначною залежністю. Наприклад, питомий електричний опір провідника можна знайти за його опором, довжиною і площею поперечного перерізу; густину однорідного тіла – за його масою і об'ємом.

Під час *сукупних* вимірювань значення величини знаходять розв'язанням системи рівнянь, одержаних під час прямих вимірювань однойменних величин. Наприклад, визначення температурного коефіцієнта лінійного розширення.

Спільні вимірювання передбачають одночасне вимірювання двох або декількох неоднорідних величин для відшукання залежності між ними. Метою спільного вимірювання зазвичай є визначення функціональної залежності між величинами.

Сукупні та спільні вимірювання в основному використовують для дослідницьких робіт.

1.2.2 Методи вимірювання

Методом вимірювання називають сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювання. Існує ряд методів вимірювання, з яких найпоширенішими є метод безпосереднього оцінювання, метод порівняння з мірою і нульовий метод.

Особливе значення має класифікація методів прямого вимірювання за *способом порівняння вимірювальної величини з її одиницею*. Існує ряд методів вимірювань, з яких найбільш поширеними є метод безпосереднього оцінювання, метод порівняння з мірою, диференційний і компенсаційний методи.

Метод безпосереднього оцінювання (відліку) – знаходження значення вимірювальної величини по відліковому пристрою вимірювального приладу прямої дії. Наприклад, вимірювання тиску пружинним приладом, маси на циферблатних вагах, сили струму амперметром. Точність такого методу обмежена, але швидкість процесу вимірювання робить його незамінним для практичного вимірювання. Найбільшою групою засобів вимірювань, що застосовують для вимірювання цим методом, є показувальні прилади, зокрема і стрілочні прилади (манометри, витратоміри, вольтметри тощо).

Метод порівняння з мірою – метод вимірювання, в якому вимірювальну величину порівнюють із величиною, що відтворюється мірою.

Методи порівняння залежно від наявності або відсутності під час порівняння різниці між вимірювальною величиною і величиною, що відтворюється мірою, поділяють на нульовий і диференційний.

Диференційний метод – полягає у визначенні різниці між вимірюваннюю і відомою величиною, після цього вимірювальну величину знаходять методом алгебраїчного додавання. Метод широко використовують для вимірювань під час наявності компонентів, що заважають – шумів, супутніх компонентів під час визначення складу суміші тощо.

Компенсаційний (нульовий) метод – полягає у врівноваженні невідомої вимірювальної величини відомою. Під час нульового методу результуючий ефект впливу величин на прилад порівняння доводять до нуля. Прикладами можуть бути врівноважений міст, ваги важелів. Компенсаційний метод застосовують, коли необхідно виміряти фізичні явища без порушення умов, у яких вони проходять, наприклад, вимірювання ЕРС нормальних елементів за відсутності у них струму.

Компенсаційний і диференційний методи забезпечують досить високу точність.

1.3 Системи одиниць вимірювання

Побудова систем одиниць вимірювання фізичних величин, що включають основні і похідні від них одиниці, обумовлено практичними потребами науки і техніки. Найменування й кількість основних одиниць вимірювання розкриває зміст і досконалість фізичних теорій, використовуваних на практиці.

Сучасна фізика вивчає рух і взаємодію мас і зарядів у просторі й часі. Отже, для фізичних вимірювань необхідні й достатні чотири основні, тобто незалежні одна від одної, одиниці вимірювання і чотири еталони для зберігання та відтворення цих одиниць – еталони маси, заряду, довжини і часу.

Діюча на цей час і обов'язкова до застосування у всіх країнах Міжнародна система одиниць *SI* як основні одиниці вимірювання використовує одиниці довжини – *метр* (м), маси – *кілограм* (кг), часу – *секунда* (с) і сили струму – *Ампер* (А). До основних одиниць у системі належить також *кандела* (кд) – одиниця сили світла, *моль* (моль) – одиниця кількості речовини і *Кельвін* (К) – одиниця температури речовини, що мають специфічне призначення.

Інші одиниці вимірювання є похідними від основних, наприклад: частота – Герц (Гц, с^{-1}); сила – Ньютон (Н, $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$); тиск – Паскаль (Па, $\text{Н}/\text{м}^2$, $\text{кг}/\text{м} \cdot \text{с}^2$); енергія, робота, кількість теплоти – Джоуль (Дж, $\text{Н} \cdot \text{м}$, $\text{м}^2 \cdot \text{кг}/\text{с}^2$); потужність, потік енергії – Ватт (Вт, $\text{Дж}/\text{с}$, $\text{м}^2 \cdot \text{кг}/\text{с}^3$).

2 ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ

2.1 Класифікація похибок

Під час багаторазового вимірювання певної величини легко переконалися, що результат вимірювання увесь час змінюється, тобто в кожному випадку спостерігають відхилення результату вимірювання від середнього значення вимірювальної величини. Крім того, проведення вимірювань тієї самої величини в інший проміжок часу дає не лише інші відхилення від середнього значення, а й інше середнє значення вимірювальної величини. Це пояснюють тим, що вимірювальна фізична величина досліджуваного тіла так само, як і використовувана міра, впродовж часу вимірювань зазнає змін. Ці зміни викликані впливом зовнішніх факторів: зміною температури довкілля, атмосферного тиску, вологості повітря, вібрації приміщення, електростатичними блукаючими зарядами, струмами і так далі. Отже, «точне» визначення вимірювальної величини, тобто без появи певних відхилень під час багаторазових вимірювань, неможливе.

Відхилення від середнього результату вимірювань ми називаємо помилками, або похибками вимірювань, і в підсумку вимірювань зазначаємо не лише середню величину, а і можливе відхилення від цієї величини. Наприклад, довжина тіла дорівнює $(1,2 \pm 0,3)$ м.

На практиці під час постановки вимірювального завдання потрібно не просто визначити значення вимірювальної величини, а і визначити її з максимально допустимою похибкою. Максимально допустиму похибку визначають технологією подальших практичних дій із матеріальним об'єктом. Отже, визначення похибки результату вимірювання є не самоціллю, а вимогою практики.

Відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірювальної величини називають *похибкою вимірювання*.

1. Відповідно до *причини появи* виділяють методичні, інструментальні та суб'єктивні похибки.

Методичні похибки залежать від досконалості методу, недостатнього врахування всіх обставин, що супроводжують вимірювання, а також усіх наближень, що допускають під час проектування приладу.

Інструментальні похибки – наслідок недоліків конструкції, технології виготовлення, справності приладу. Ці похибки можуть бути частково усунені регулюванням приладу.

Суб'єктивні похибки залежать від індивідуальних особливостей оператора, який проводить вимірювання.

Під час кожного вимірювання повинна бути відома ступінь точності його результату, оцінювана похибкою вимірювання. Лише тоді одержане значення тієї або іншої величини має практичний сенс. Похибка вимірювання може бути виражена у вигляді *абсолютної* або *відносної величини* і буває додатною або від'ємною.

2. *За формою числового виразу* похибки вимірювань поділяють на абсолютні та відносні.

Абсолютною похибкою Δx (помилкою) вимірювання називають різницю між виміряним $x_{вим}$ та істинним x_0 значеннями фізичної величини:

$$\pm \Delta x = x_{вим} - x_0 . \quad (2.1)$$

Типова форма подання результату вимірювання така:

$$x_0 = x_{вим} \pm \Delta x . \quad (2.2)$$

Це означає, що істинне значення з досить високою ймовірністю перебуває в інтервалі

$$x_{вим} - \Delta x < x_0 < x_{вим} + \Delta x . \quad (2.3)$$

Інтервал (2.3) називають *інтервалом довіри*.

Відносна похибка характеризує якість вимірювання і показує, яку частку становить абсолютна похибка від значення вимірювальної величини (у частках або відсотках)

$$\delta = \frac{x_{\text{вим}} - x_0}{x_0} = \frac{\Delta x}{x_0}. \quad (2.4)$$

Якість вимірювань, їх точність зручно характеризувати саме відносною похибкою.

3. *За закономірністю появи* під час багаторазових випробувань розрізняють похибки систематичні та випадкові.

Систематичними похибками називають такі похибки, які за повторних вимірювань однієї і тієї самої величини залишаються сталими або змінюються за певним законом. Вплив цих похибок на результати вимірювань здебільшого може бути врахований.

Випадкова похибка – похибка вимірювання, викликана невідомими причинами або відомими причинами випадкового прояву. Під час повторних вимірювань вони не залишаються сталими, тому що виникають внаслідок спільного впливу на процес вимірювання багатьох причин, кожна з яких проявляє себе по-різному і незалежна одна від одної. Вплив випадкових похибок на результати вимірювань зменшують, використовуючи способи оброблення результатів вимірювань, що базуються на положенні теорії ймовірностей і математичної статистики.

Принципова відмінність між систематичними і випадковими похибками щодо їх впливу на результат вимірювань полягає у тому, що систематична похибка робить вимірювання неправильними, а випадкова – недостовірними, вносячи елемент невизначеності. З цього випливає, що зазначені похибки повинні оцінюватися по-різному. Систематичну похибку визначають кількісно і її вплив враховують корекцією вимірюваного значення. Випадкову похибку оцінюють статистичними методами теорії ймовірностей і зазначають спільно з результатом вимірювань.

Іноді в результатах спостережень може з'явитися похибка, що істотно перевищує очікувану за даних умов – це так названа *груба похибка*. Причинами її появи зазвичай є помилки оператора (так названі промахи), несправність засобів вимірювання або

різка зміна умов вимірювань. Результати вимірювань, що містять грубі похибки, відкидають як неточні.

4. *За умовами появи* розрізняють статичні й динамічні похибки.

Статичні похибки з'являються під час сталого режиму вимірювання, коли вхідний сигнал вимірювального приладу і його свідчення зберігають постійні значення.

Під *динамічною* похибкою розуміють ту частину похибки, яка додається до статичної в непостійному режимі вимірювання й обумовлена інерційністю засобів вимірювань.

2.2 Похибки засобів вимірювань. Клас точності

Вимірювальними приладами називають пристрої вимірювань, що використовують для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

Кожен вимірювальний прилад складається з ряду частин і вузлів і має задані метрологічні властивості.

У техніці застосовують прилади, за допомогою яких проводять вимірювання лише з певною, заздалегідь заданою точністю – *основною похибкою*, що допускають нормами.

Основною похибкою називають похибку засобу вимірювань, що використовують у нормальних умовах експлуатації (температура довкілля, тиск, напруга живлення, частота струму тощо), які зазвичай визначені в нормативно-технічних документах на даний засіб вимірювань. Кожен, навіть новий, прилад має основну похибку, яка з плином часу зазвичай зростає завдяки появі залишкових деформацій пружин, зношення тертьових частин та інших причин.

Додаткові похибки виникають через неправильне встановлення приладу, вплив несприятливих зовнішніх умов (вібрацію, високу або низьку температуру і вологість навколишнього повітря, відхилення напруги і частоти джерела живлення тощо). Застосування недосконалого методу вимірювання і впливу індивідуальних особливостей спостерігача можуть становити значну величину.

Для кожного приладу залежно від його призначення, якості та діапазону показань нормами встановлюють допустиму основну похибку, що виражають в абсолютних або відносних (наведених) величинах.

Допустима основна похибка характеризує найбільше можливе відхилення показань приладу від дійсного значення в обидві сторони, у зв'язку з цим перед нею ставлять знак \pm . Якщо під час перевірки приладу основна похибка в будь-якій точці шкали не перевищує допустимої, то прилад визнають придатним до застосування. В іншому разі він повинен бути підданий ремонту або переградуванню.

Наведену допустиму основну похибку приладу δ' визначають як відношення абсолютної основної похибки $\Delta x'$ до діапазону показань $N_{\max} - N_{\min}$ і виражають у відсотках:

$$\delta' = \frac{\Delta x'}{N_{\max} - N_{\min}} \cdot 100 \% \quad (2.5)$$

За наведеною основною похибкою прилади поділяють на різні класи точності.

Клас точності – найбільше значення наведеної похибки вимірювального приладу. Клас точності є узагальненою характеристикою засобів вимірювань, яку визначають межами основної та додаткових похибок, а також іншими властивостями засобів вимірювань, що впливають на точність.

Класи точності приладу встановлюють під час випуску, грабуючи його за зразковим приладом у стандартних умовах. Засобам вимірювань, межі допустимих похибок яких виражені як відносні або наведені похибки, повинні бути присвоєні класи точності, обрані з ряду чисел: (1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6) 10^n , де $n = 1; 0; -1; -2$ і т. д.

Позначення класів точності проводять залежно від способів завдання меж допустимої основної похибки. Якщо останню виражають наведеною основною похибкою, то клас точності засобів вимірювання позначають арабськими цифрами, якщо виражають відносною похибкою—арабськими цифрами у колі

(наприклад, позначення 2 та ② наведені для класу точності 2 під час вираження останнього через наведену та відносну похибки, відповідно).

Варіацією приладу називають найбільшу, одержану експериментально різницю між показаннями вимірювального приладу під час прямого та зворотного ходів, що відповідають одному і тому самому дійсному значенню вимірювальної величини за однакових умов вимірювання. Варіації викликаються тертям у механізмі приладу, зазорами (люфтами) в кінематичних парах, гістерезисом тощо.

Варіацію технічних вимірювальних приладів визначають як найбільшу різницю показань приладу під час перевірки, одержану під час прямого і зворотному ходів, за одним і тим самим дійсним значенням вимірювальної величини. Наведену варіацію виражають у відсотках від максимального значення шкали приладу:

$$B = \frac{X_n - X_z}{N_{max} - N_{min}} \cdot 100 \%, \quad (2.6)$$

де $X_n - X_z$ – найбільша різниця в показаннях приладу під час прямого та зворотного показань приладу для одного значення вимірювальної величини.

Варіація не повинна перевищувати допустиму похибку приладу.

3 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

3.1 Класифікація вимірювальних приладів

Залежно від призначення прилади для вимірювання поділяють на декілька груп. Основна класифікація передбачає поділ приладів *за родом вимірювальних величин*. Умовно передбачені такі найменування найпоширеніших приладів, призначених для вимірювання:

- *температури* – термометри, пірометри, тепловізори;
- *тиску* – манометри, вакуумметри, мановакуумметри, тягоміри, напороміри, барометри, дифманометри;
- *рівня рідини і сипучих тіл* – рівнеміри і покажчики рівня;
- *витрати і кількості речовини* – витратоміри, лічильники, ваги і дозатори;
- *складу газових сумішей та їх вологості* – газоаналізатори і психрометри;
- *густини* – денсиметри;
- *в'язкості* – віскозиметри тощо.

Додаткова класифікація поділяє зазначені прилади на такі групи:

- *за призначенням* – промислові (технічні), лабораторні, зразкові та еталонні;
- *за характером показань* – показувальні, реєструвальні (самописні та друкувальні) й інтегрувальні прилади;
- *за формою подання показань* – аналогові та цифрові;
- *за принципом дії* – механічні, електричні, рідинні, хімічні, радіоізотопні та ін.;
- *за характером використання* – оперативні, облікові і розрахункові;
- *за місцем розміщення* – місцеві та з дистанційною передачею показань;
- *за умовами роботи* – стаціонарні (щитові) й переносні.

Промислові прилади є найпоширенішими засобами вимірювання, застосовуваними для практичних цілей, що мають порівняно просту та міцну конструкцію і високу надійність дії.

Точність цих приладів, призначених для роботи в несприятливих умовах (за наявності пилу, вологи, вібрації тощо), порівняно невисока. Показання промислових приладів добре бачимо на відстані.

Лабораторні прилади застосовують зазвичай для точних вимірювань. Ними користуються зазвичай під час дослідницьких і налагоджувальних робіт. Для одержання великої точності вимірювання лабораторні прилади мають ретельне виконання, удосконалені схеми і спеціальні пристосування для відліку показань. Під час користування цими приладами їх показання коригують на підставі дослідів або розрахунків.

Еталонні і зразкові прилади призначені, головним чином, для перевірки засобів вимірювання. Еталонами називають міри і прилади, призначені для зберігання одиниць вимірювання і відтворення їх з найвищою точністю. Еталони бувають первинними і вторинними. Найбільш точними є первинні еталони, які є державними еталонами одиниць вимірювання. Значення вторинних еталонів установлюють за первинними. До вторинних належать також робочі еталони, призначені для передавання розмірів одиниць зразковим мірам і приладам. Зразкові прилади використовують для передавання методом перевірки і градирування правильних значень одиниць вимірювання від еталонів до інших приладів. Зразкові прилади бувають чотирьох розрядів залежно від їхньої точності та способів перевірки. Прилади 1-го розряду перевіряють лише за робочими еталонами, 2-го розряду – за приладами 1-го розряду тощо.

Показувальні прилади дають миттєве значення вимірювальної величини, відлічуваної за шкалою, а *реєструвальні прилади* – записують зміну цього значення в часі на діаграмному папері (самописні прилади) або друкують ці показання в цифровій формі (друкувальні прилади).

Самописні прилади створені для запису однієї (одноточкові, або одноканальні прилади) або декількох (багатоточкові, або багатоканальні прилади) вимірювальних величин.

Інтегрувальні прилади (лічильники або інтегратори) дозволяють визначати сумарне значення вимірювальної

величини за будь-який проміжок часу. Для цього показання приладу зазначають на початку і вкінці вимірювання, і сумарне значення вимірюваної величини визначають як різницю між кінцевим і початковим відрахуванням.

Аналогові прилади дають показання у вигляді безперервної функції вимірювальної величини. До них належать, наприклад, стрілочні показувальні прилади і більшість самописних приладів.

Цифрові прилади мають показання у вигляді окремих дискретних сигналів вимірювальної інформації в цифровій формі. До цих приладів входять прилади-показчики із цифровим відліком, друкувальні і більшість самописних.

Оперативні прилади є промисловими засобами вимірювання. За їх показниками здійснюють керування роботою виробничих установок. Ці прилади мають велике значення для забезпечення корисної експлуатації технологічного устаткування, виконуються приладами-показчиками і самописними приладами.

Облікові й розрахункові прилади використовують для технічного обліку роботи установок і взаємних розрахунків, відповідно бувають самописними та інтегровальними.

Місцеві прилади встановлюють безпосередньо в місцях вимірювання. Здебільшого їх застосовують для менш відповідальних спостережень, а також для періодичних вимірювань під час запуску і зупинення агрегатів.

Прилади з дистанційним передаванням показань на щити керування є основним видом промислових приладів, що забезпечують централізацію контролю за роботою установок. Промислові вимірювальні прилади зазвичай є стаціонарними, тобто призначеними для розміщення (монтажу) на щитах, стінах, колонах, кронштейнах тощо. Більшість інших приладів (лабораторні, зразкові та ін.) виконують переносними, установлюваними під час вимірювань на столах, стендах тощо.

Вимірювальний прилад може бути конструктивно виконаний як одне ціле (у загальному корпусі) або складатися з декількох частин (в окремих корпусах), що самостійно беруть участь у процесі вимірювання і являють собою вимірювальний комплект.

Прилад, що має один корпус, найчастіше є місцевим, а який складається з декількох корпусів – дистанційним. В обох випадках прилад зв'язують з місцем вимірювання за допомогою сполучної лінії (проводів або трубок), яка передає йому значення вимірювальної величини.

Більшість вимірювальних приладів із дистанційною передачею показань містять у собі дві самостійні частини: первинний вимірювальний перетворювач (датчик) і вторинний прилад.

3.2 Основні властивості вимірювальних приладів

Залежно від призначення, побудови і принципу дії вимірювальні прилади мають різні метрологічні властивості, які в основному характеризуються точністю, чутливістю, швидкодією, надійністю роботи тощо.

Точність вимірювального приладу визначають ступенем достовірності його показань, тобто тим, наскільки результати вимірювань відрізняються від істинних значень вимірюваної величини.

Чутливістю S приладу називають відношення лінійного або кутового переміщення покажчика ΔY до приросту вимірювальної величини ΔX , що викликало це переміщення.

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}. \quad (3.1)$$

Поріг чутливості – найменша зміна значення вимірювальної величини, здатна викликати найменшу зміну показання вимірювального приладу. Поріг чутливості обумовлений переважно наявністю тертя в механізмах приладу. Поріг чутливості зазвичай виражають у частках абсолютного значення основної похибки засобу вимірювань.

Швидкодія приладу характеризує час із моменту початку зміни вимірювальної величини до моменту відображення його приладом. Швидкодія залежить від інерційності приладу, що

викликає запізнювання показань. Інерційність приладів здебільшого викликана тепловими, механічними і гідравлічними факторами. Чим більше швидкодіючим є прилад, тим вище його якість.

Надійність приладу характеризує його властивість зберігати працездатність упродовж певного часу. Під працездатністю розуміють стан приладу, за якого він може виконувати свої функції відповідно до встановлених для нього технічних вимог. Часто в технічній документації про прилад свідчать імовірність безвідмовної його роботи в заданому інтервалі часу.

4 ТЕХНІКА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ

4.1 Первинні вимірювальні перетворювачі (датчики)

Первинним вимірювальним перетворювачем (ПВП) (датчиком) називають чутливий елемент автоматичного пристрою, що сприймає контрольовану величину і перетворює її у вихідний сигнал, зручний для передавання на відстані та впливу на наступні елементи автоматичних пристроїв.

Зазвичай вхідний сигнал датчика має однакову фізичну природу з регульованим параметром (лінійне й кутове переміщення, частота обертання вала, тиск, температура тощо), а вихідний сигнал датчика є електричною (струм, напруга, частота), або пневматичною (тиск) величиною.

Датчики призначені для вимірювання різних фізичних величин (параметрів виробничих процесів): температури, тиску, вологості, концентрації розчинів тощо. Вони являють собою досить різноманітні пристрої, які класифікують за вимірювальною величиною (датчики температури, тиску, рівня, густини тощо), принципом дії (електричні, пневматичні тощо), видом і характером вихідного сигналу (безперервний і дискретний).

Основними вимогами, що висувають до датчиків, є висока чутливість, лінійна залежність вихідної величини від вхідної, мала інерційність.

Основними характеристиками датчиків є вхідний параметр, вихідний сигнал, статична та динамічна характеристики, похибки, конструктивні характеристики.

Статичною характеристикою датчика є залежність вихідної величини від вхідної, тобто $X_{\text{вих}} = f(X_{\text{вх}})$ (рис. 4.1 а). За статичною характеристикою можна визначити такі параметри датчика, як чутливість S (коефіцієнт перетворення) датчика (за формулою (3.1)), поріг чутливості, лінійність, величину дрейфу, динамічний діапазон, параметри гістерезису тощо.

Динамічну характеристику можна навести у вигляді графіка перехідного процесу $X_{вих} = f(t)$ під час стрибкоподібної зміни вхідного сигналу (рис. 4.1 б).

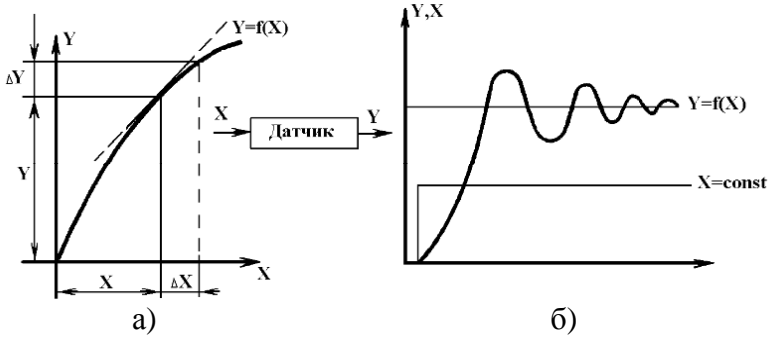


Рисунок 4.1 – Приклади статичної та динамічної характеристик датчика:

- а) статична характеристика;
- б) динамічна характеристика

Хоча номенклатура датчиків дуже широка, але принципів дії, на яких вони засновані, відносно небагато.

4.1.1 Ємнісні датчики

Вони являють собою конденсатор, ємність якого змінюється під час зміни вимірювальної неелектричної величини. Конденсатор формують із двох пластин, розділених шаром діелектрика, а його ємність визначають виразом

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{x}, \quad (4.1)$$

де ε – діелектрична проникність діелектрика;
 S – активна площа конденсатора;
 x – відстань між пластинами.

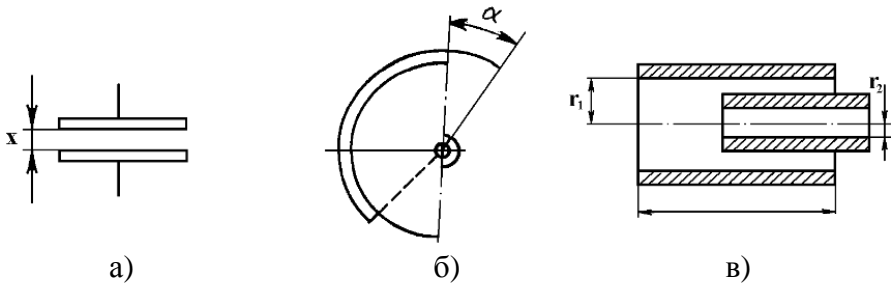


Рисунок 4.2 – Ємнісні датчики:

- а) плоский ємнісний датчик;
- б) ємнісний датчик з кутовим переміщенням;
- в) циліндричний ємнісний датчик

Зміну ємності досягають зміною відстані між пластинами датчика (рис. 4.2 а), їх робочої поверхні (рис. 4.2 б) або діелектричних властивостей середовища (рис. 4.2 в), в якій містяться пластини.

Загальними недоліками ємнісних датчиків є практична неможливість працювати на промисловій частоті 50 Гц і, отже, необхідність у спеціальному джерелі живлення високої частоти.

Ємність такого перетворювача зазвичай вимірюють за допомогою таких схем:

- 1) мостової схеми змінного струму, в якій перетворювач утворює одне плече моста;
- 2) мультівібратора, в якому конденсатор у ланцюзі визначає частоту коливань.

4.1.2 П'єзоелектричні перетворювачі

Одним з ємнісних типів перетворення є п'єзоелектричний ефект, за якого зміна вимірювальної величини перетворюється в зміну електростатичного заряду або напруги, що виникають у деяких матеріалах за їх механічної напруги. Напруга зазвичай утворюється під дією сил стиснення, розтягування або вигинання, які є вимірювальними величинами і впливають на

чутливий елемент або безпосередньо, або за допомогою деякого механічного зв'язку.

Щоб визначити зміну електричного заряду або напруги, до п'єзоелектричного матеріалу під'єднують дві металеві пластинки (рис. 4.3), які фактично утворюють пластини конденсатора, ємність якого визначають у вигляді

$$C = \frac{Q}{U}, \quad (4.2)$$

де Q – заряд;
 U – напруга.

За п'єзоелектричний матеріал, що використовують у конструкції такого перетворювача, вибирають природні кристали, такі як кварц; синтетичні кристали, наприклад, сульфат літію; поляризована феромагнітна кераміка, наприклад, титанат барію.

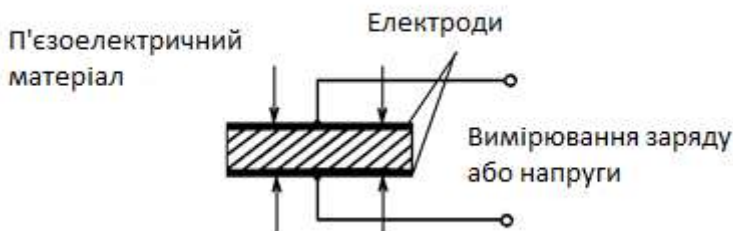


Рисунок 4.3 – П'єзоелектричний перетворювач

4.1.3 Електромагнітні перетворювачі

Принцип дії таких датчиків заснований на зміні амплітуди коливань генератора під час внесення в активну зону датчика металевого, магнітного, феро-магнітного або аморфного матеріалу певних розмірів за рахунок зміни опору котушки індуктивності під час переміщення сердечника (рис. 4.4). Котушку індуктивності зазвичай під'єднують у диференціальну або мостову вимірювальну схему змінного струму.

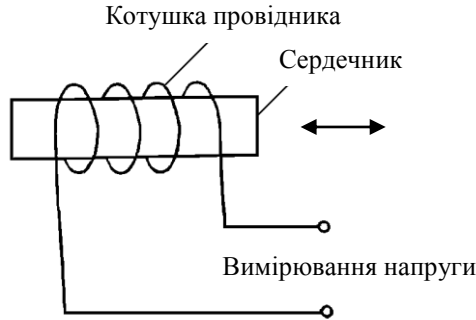


Рисунок 4.4 – Електромагнітне перетворення

4.1.4 Фотоелектричні датчики

Принцип дії таких датчиків заснований на використанні впливу змін вимірювального параметра на інтенсивність світлового випромінювання. За джерело світлового випромінювання зазвичай використовують лампи розжарювання, рентгенівські трубки та радіоактивні речовини. Приймачі випромінювання – фотоелементи, іонізаційні камери, газорозрядні лічильники.

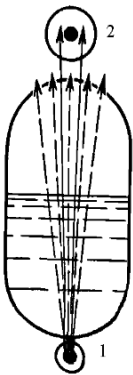


Рисунок 4.5 –
Радіоізотопний
рівнемір

Фотоелектричні датчики широко використовують для вимірювання та контролю різних параметрів виробничих процесів – температури, рівня рідини, концентрації розчинів, прозорості газового середовища, для обліку, сортування і відбраковування штучних виробів, для контролю стану поверхні тіл в автоматичних системах, для стеження за зрізом деталі під час її оброблення за контуром тощо.

Наприклад, на рисунку 4.5 зображений радіоізотопний рівнемір, принцип дії якого заснований на фотоелектричному перетворенні.

4.1.5 Резистивні, термоелектричні та іонні перетворювачі

У промисловості широко застосовують *датчики опору* (резистивні перетворювачі), засновані на зміні опору матеріалу датчика залежно від вимірюваних властивостей середовища. Зміна опору може бути викликана різними ефектами в перетворювальному елементі, наприклад, нагріванням або охолодженням, механічною напругою, впливом світлового потоку, зволоженням, осушенням, переміщенням контактної щітки реостата.

Термоелектричні перетворювачі засновані на прямому перетворенні теплової енергії в електричну (термопари).

Іонні перетворювачі перетворюють зміну вимірювальної величини в зміну струму іонізації, що проходить, наприклад, через рідину, розміщену між двома електродами (*pH* -метри).

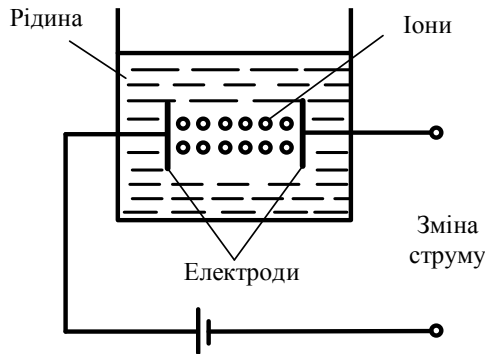


Рисунок 4.6 – Іонізаційне перетворення

Неелектричні перетворювачі найчастіше перетворюють зміну вимірювальної величини в лінійне або кутове переміщення (манометричні пружини, мембранні прилади).

4.2 Проміжні перетворювачі

Вимірювальні перетворювачі, встановлені у вимірювальній системі після ПВП, є проміжними або вторинними. Принципи перетворення, а також конструктивна реалізація проміжних

перетворювачів залежать не лише від вимірювальної величини, а і від необхідного вторинного сигналу, що її відображає.

Проміжний перетворювач – призначений для здійснення всіх необхідних перетворень сигналу вимірювальної інформації (посилення, випрямлення, перетворення одного виду енергії в інший тощо).

Передавальний перетворювач – призначений для дистанційної передачі сигналу вимірювальної інформації.

4.2.1 Сельсинні передавальні перетворювачі

Для дистанційної передачі кутових переміщень, наприклад, у рівнемірах, використовують сельсинні передавальні пристрої.

Сельсин являє собою мініатюрну трифазову електричну машину, схожу з синхронним генератором або двигуном (рис. 4.7). Найчастіше ротор сельсина має одну обмотку (обмотка збудження), а статор – три обмотки (обмотки синхронізації), осі яких зсунуті на 120° одна відносно іншої.

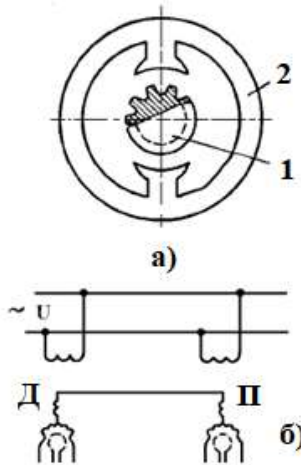


Рисунок 4.7 – Сельсинна телепередача:

- а) схема приладу сельсина: 1 – ротор, 2 – статор;
- б) схема ввімкнення сельсина

Такий варіант здійснюють у разі, якщо ротор має явно виражені полюси, а статор неявно виражені полюси.

Обмотки збудження живлять змінним струмом, а кінці трифазової обмотки з'єднують між собою. Оскільки обмотку ротора сельсина-датчика (Д) живлять змінною напругою, то змінний магнітний потік, створюваний нею, буде індукувати в обмотках статора електрорушійну силу (ЕРС), величину якої визначають виразом:

$$\begin{aligned} E_{1Д} &= E_{max} \cdot \cos \alpha, \\ E_{2Д} &= E_{max} \cdot \cos(\alpha + 120^\circ), \\ E_{3Д} &= E_{max} \cdot \cos(\alpha + 240^\circ), \end{aligned} \quad (4.3)$$

де α – кут повороту ротора датчика;

E_{max} – значення ЕРС у разі збігу осей обмоток ротора і статора.

Аналогічна картина відбувається і в сельсині-приймачі (П):

$$\begin{aligned} E_{1П} &= E_{max} \cdot \cos \beta, \\ E_{2П} &= E_{max} \cdot \cos(\beta + 120^\circ), \\ E_{3П} &= E_{max} \cdot \cos(\beta + 240^\circ), \end{aligned} \quad (4.4)$$

де β – кут повороту ротора приймача.

Якщо положення обох роторів щодо обмоток статорів буде однаковим, тобто $\alpha = \beta$, то струми, створювані в цих обмотках, будуть також однакові внаслідок рівності наведених ЕРС. Водночас синхронізуючий момент $M_{синх.}$ дорівнює нулю.

Під час відхилення ротора сельсина-датчика від узгодженого положення, тобто при $\alpha \neq \beta$, наведені у відповідних обмотках ЕРС будуть відрізнятися за величиною: $E_{Д} \neq E_{П}$. Отже, струми, що виникають у зустрічно ввімкнених обмотках статора, не будуть врівноважуватися.

Синхронізуювальний момент, який виникає, визначають так:

$$M_{синх} = M_{max} \cdot \cos \theta, \quad (4.5)$$

де $\theta = \alpha - \beta$;

M_{\max} – найбільший момент при $\theta = 90^\circ$.

Отже, за постійного значення магнітного потоку однофазової обмотки ротора вихідна ЕРС, що наводиться в трифазовій обмотці, пропорційна куту повороту ротора.

Ротор сельсина-датчика пов'язаний із чутливим елементом вимірювального приладу, а ротор сельсина-приймача – з відліковою частиною вторинного приладу.

Найбільш істотним недоліком описаних вище контактних сельсинів – тертя в контактних щітках, що призводить до похибок у роботі сельсина і знижує її надійність. Безконтактні сельсини позбавлені цих недоліків.

4.2.2 Диференційно-трансформаторні перетворювачі

Вони призначені для перетворення лінійного переміщення сердечника у вихідний електричний сигнал. Вихідним параметром у перетворювачів цього типу є значення взаємної індуктивності між обмотками. Диференційно-трансформаторні перетворювачі широко застосовують у первинних приладах (манометрах, дифманометрах тощо), за передавальні перетворювачі та у вторинних приладах – за компенсувальні перетворювачі.

Диференційно-трансформаторну схему (рис. 4.8) використовують для передавання показань на відстань.

Схема працює за принципом компенсації різниці трансформованих напруг у вторинних обмотках котушок датчика і вторинного приладу. Положення сердечника I датчика залежить від значення вимірювальної величини, а сердечника II компенсувального пристрою – вторинного приладу – від кута повороту вихідного вала редуктора реверсивного двигуна.

Кожна з котушок датчика і вторинного приладу складається з первинної III і вторинних обмоток IV. Вторинні обмотки складаються з двох секцій з однаковою кількістю витків. Кінці кожної секції з'єднані між собою в кожній котушці, а початки – з початками відповідних секцій іншої котушки.

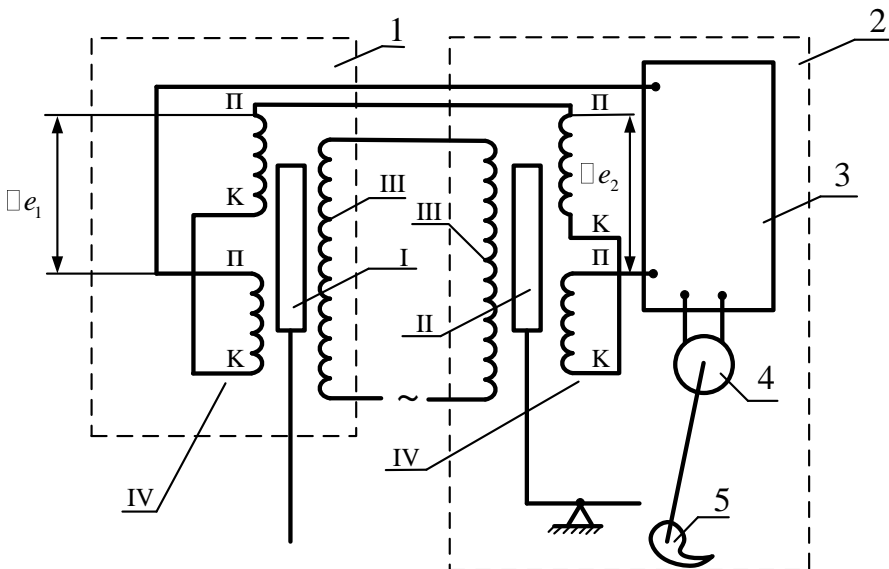


Рисунок 4.8 – Схема диференційно-трансформаторної передачі:

- 1 – первинний прилад;
- 2 – вторинний прилад;
- 3 – електронний підсилювач;
- 4 – реверсивний двигун;
- 5 – профіль

Коли сердечник (датчика або приладу) розміщений у середньому положенні, ЕРС, індуковані в кожній секції, однакові між собою, спрямовані назустріч одна одній, і між початками секцій вторинної обмотки IV напруги немає.

Під час зміщення сердечника від середнього положення магнітний потік, що пронизує вторинну обмотку, буде різним для кожної секції, внаслідок цього індуковані в них ЕРС не будуть однаковими, і між початками цих секцій з'являться ЕРС (Δe_1 і Δe_2). Фази і величини цих різниць ЕРС будуть залежати від величини і напрямку зсуву сердечників у котушках. Різниці ЕРС датчика і вторинного приладу спрямовані назустріч одна одній.

Напругу небалансу диференційно-трансформаторної схеми визначають виразом

$$\Delta U = \Delta e_1 - \Delta e_2. \quad (4.6)$$

Ця напруга змінює фазу залежно від знака нерівностей $\Delta e_1 < \Delta e_2$ або $\Delta e_1 > \Delta e_2$.

Напруга небалансу надходить на вхід підсилювача. Підсилену напругу подають на керуючу обмотку реверсивного двигуна, який обертається до настання рівності $\Delta e_1 = \Delta e_2$.

У цей момент схема стане врівноваженою і реверсивний двигун зупиниться. Водночас струм у сполучних проводах відсутній і втрата напруги в них дорівнює нулю. Це дозволяє досягати відстані між датчиками і приладами до 300 м.

4.2.3 Пневматичні перетворювачі

У пневматичних перетворювачах основним елементом є перетворювач типу «сопло-заслінка» (рис. 4.9).

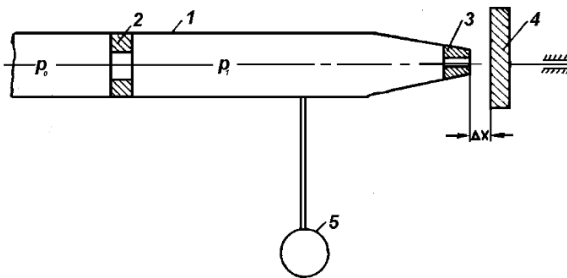


Рисунок 4.9 – Пневматичний перетворювач типу «сопло-заслінка»:

1 – трубка; 2 – дросель постійного перетину;
3 – сопло; 4 – заслінка; 5 – манометр

У трубку 1 невеликого діаметра безперервно надходить повітря під тиском p_0 і, пройшовши через дросель постійного перетину 2, виходить в атмосферу через сопло 3. Перед соплом 3 розміщена заслінка 4. Якщо змінювати проміжок Δx між

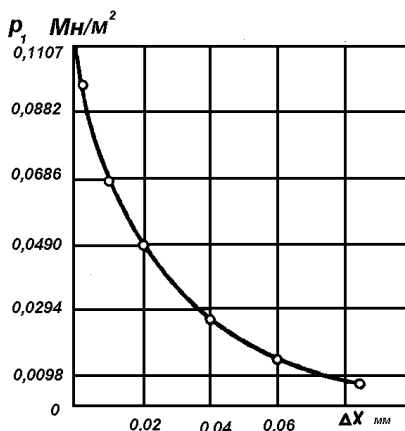


Рисунок 4.10 –
Залежність тиску повітря p_1
у міждросельному просторі
системи сопло-заслінка від
величини проміжку Δx між
соплом і заслінкою

соплом і заслінкою, то тиск повітря p_1 у міждросельному просторі буде також змінюватися: збільшуватися з наближенням заслінки до сопла і зменшуватися під час віддалення заслінки від сопла. Зміну тиску p_1 контролює манометр 5.

Потрібно відзначити, що невеликі переміщення заслінки (до 0,08 мм) викликають значні – від 0,0098 Мн/м² до 0,1078 Мн/м² – зміни тиску повітря p_1 , що впливає з графіка залежності між проміжком Δx і тиском p_1 (рис. 4.10).

4.3 Вторинні прилади

4.3.1 Характеристика елементів вимірювальних приладів

Вторинні прилади призначені для перетворення сигналу, що надходить від датчика, у сигнал, зручний для спостереження.

Головними вузлами вимірювального приладу є вимірювальний і відліковий пристрої. Перший із них безпосередньо здійснює вимірювання фізичної величини за допомогою чутливого елемента і за необхідності підсилює вхідний сигнал, а другий – показує, записує або інтегрує одержане значення. Один і той самий вторинний прилад може

бути використаний для вимірювання різних параметрів (різниця буде лише в градуванні шкали).

Вимірювальний пристрій приладів досить різний і залежить від роду вимірювальної величини (тиск, температура тощо) і принципу дії приладу (механічний, електричний та ін.). Здебільшого вимірювальний пристрій складається з рухливої і нерухомої частин. Переміщення рухливої частини відбувається під впливом вимірювальної величини на чутливий елемент приладу.

Відліковий пристрій залежно від характеру показань приладів виконують у таких виглядах:

- шкали показчика (прилада-показчика);
- записувального пристрою і діаграмного паперу (самописного приладу);
- рахункового пристрою (інтегрувального приладу).

За *способом відліку значень* вимірювальних величин прилади поділяють на показувальні прилади, тобто допускають лише відлік показань, самописні прилади, в яких передбачена реєстрація свідчень, та інтегрувальні (див. п. 3.1).

До показувальних приладів належать аналогові й цифрові прилади. Відлікові пристрої аналогових приладів складаються зі шкали і показчика у формі стрілки; показання приладу є безперервною функцією вимірювальної величини.

Цифровий вимірювальний прилад автоматично виробляє дискретні сигнали вимірювальної інформації, показання приладу подані в цифровій формі.

4.3.2 Аналогові вторинні прилади

Шкала *показувального приладу* складається з ряду послідовно нанесених на плоскому або профільному (циліндричному) циферблаті поділок, що відповідають числовим значенням вимірювальної величини.

Поділки і числа на циферблаті називають *градируванням шкали*. Різницю значень, що відповідають двом сусіднім поділкам шкали, виражену в одиницях вимірювання, називають *ціною поділки шкали*.

Показання приладу, що характеризує значення вимірювальної величини, визначають як кількість відлічених поділок, помножених на ціну поділки шкали. У певних випадках показання одержують множенням відліку на сталу приладу, що виражають в одиницях вимірювання, а також за даними градуйованої характеристики приладу.

Шкали, нульова відмітка яких збігається з початком або кінцем шкали, називають *однобічними*. Якщо поділки розміщені по обидві боки від нуля, то таку шкалу називають *двобічною* (наприклад, ртутний термометр із межею показань від -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$). Шкалу називають *безнульовою*, якщо вона не має нульової позначки (наприклад, шкала ртутного термометра з межами показань від $+50^{\circ}\text{C}$ до $+200^{\circ}\text{C}$). Вимірювання за приладом із безнульовою шкалою точніше, ніж з однобічною або двобічною шкалою, тому що вона має меншу ціну поділки. У певних вимірювальних приладах циферблат зі шкалою роблять обертовим.

Шкала вимірювальних приладів буває прямолінійною, дуговою і круговою (рис. 4.11). Дугова шкала має центральний кут менший ніж 180° , а кругова – більший ніж 180° .

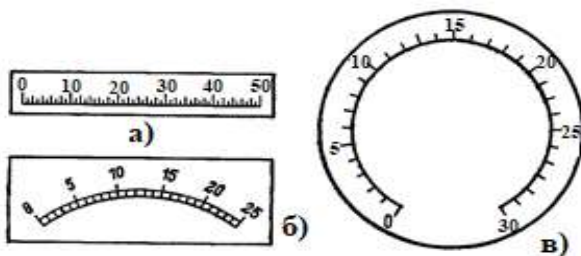
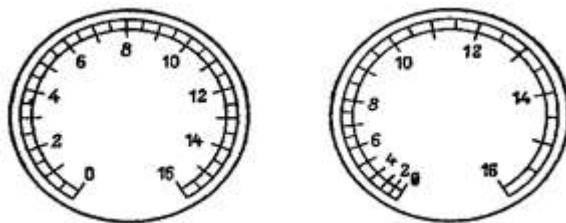


Рисунок 4.11 – Шкали вимірювальних приладів:
а) прямолінійна; б) дугова; в) кругова

Крім того, шкала може бути рівномірною і нерівномірною (рис. 4.12). Рівномірна шкала має однакові відстані між поділками і тому більш зручна для вимірювання, ніж нерівномірна, в якій ці відстані змінюються за певним законом

(параболі, синусоїді тощо). Точність відліку показань за рівномірною шкалою вища, ніж за нерівномірною.



а)

б)

Рисунок 4.12 – Кругові шкали приладів:

а) рівномірна; б) нерівномірна

Як показчик у промислових приладах використовують добре помітну на відстані клинову або клиново-стрижневу стрілку, тоді як більш точні прилади забезпечують ножовою стрілкою, кінець якої має вигляд леза, розміщеного за нормаллю до площини шкали.

Положення показчика визначають кутовим або лінійним його переміщенням від нуля або початку шкали. Залежність між станом показчика і відліком називають *характеристикою шкали* (статична характеристика вимірювального приладу).

Характеристика шкали приладів з кутовим переміщенням показчика виражають рівнянням

$$q = f(\varphi), \quad (4.7)$$

де φ – кут повороту показчика від нульової позначки шкали (для безнульових шкал – від початку шкали);

q – відлік за шкалою.

Для приладів із прямолінійними шкалами характеристика шкали має такий вигляд:

$$q = f_1(N), \quad (4.8)$$

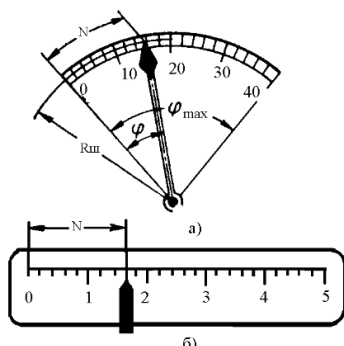


Рисунок 4.13 – Відлікові пристрої у вигляді шкали:

- а) з дуговою шкалою;
- б) з прямолінійною шкалою

де N – лінійний зсув покажчика від нуля шкали (для безнульових шкал – від початку шкали).

На рисунку 4.13 схематично показані відлікові пристрої у вигляді шкали.

Самописні (реєструвальні) прилади забезпечені пристосуваннями, що автоматично записують на паперовій стрічці або диску поточне значення вимірювальної величини в часі.

На рисунку 4.14 наведені схеми типових реєструвальних пристроїв.

Діаграмний диск (рис. 4.14 а) діаметром 250–300 мм має полярну координатну сітку у вигляді концентричних кіл, що відповідають значенням вимірювальної величини, і радіальних дуг, які відповідають значенням часу. Частота обертання діаграмного диска – 1 або 2 об./добу.

В одному випадку на паперовій стрічці (диску) пером викреслюють безперервну лінію (рис. 4.14 б), в іншому – на паперовій стрічці періодично друкують числові значення відліків (рис. 4.14 в).

На одній паперовій стрічці можуть бути записані кілька кривих. У цьому разі в прилад вбудовують автоматичний перемикач, що послідовно під'єднує до вимірювальної системи один із датчиків, розміщених у декількох точках вимірювання.

Комбіновані прилади одночасно показують і реєструють вимірювальну величину. Вимірювальні прилади можуть забезпечуватися також додатковими пристроями для сигналізації (прилади, що сигналізують), регулювання

вимірювальної величини (прилади, що регулюють) та інших цілей.

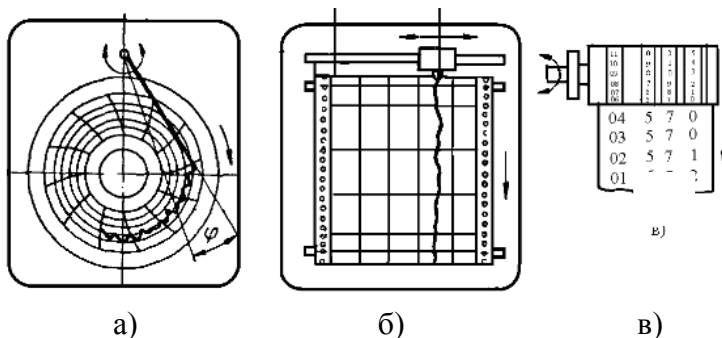


Рисунок 4.14 – Самописці:

- а) із записом у полярних координатах на дисковій діаграмі;
- б) із записом у прямокутних координатах на стрічковій діаграмі;
- в) з друкарським пристроєм

4.3.3 Цифрові прилади

Цифровими вимірювальними приладами (ЦВП) називають прилади, які в процесі вимірювання здійснюють автоматичне перетворення неперервної вимірювальної величини в дискретну з подальшою індикацією результату вимірювань на цифровому відліковому пристрої або реєстрацією його за допомогою цифродрукуючого пристрою.

ЦВП складається з двох обов'язкових вузлів; аналого-цифрового перетворювача (АЦП) і цифрового відлікового пристрою. АЦП видає код відповідно до значення вимірювальної величини. Відліковий пристрій відображає це значення в цифровій формі.

Цифрові сигнали у вигляді кінцевих числових значень візуально відображають різноманітними цифровими індикаторами. У механічних й електромеханічних лічильниках цифровими індикаторами є самі рахункові колеса (диски, барабани), на які нанесені цифри.

На рисунку 4.15 а зображений цифровий індикатор мозаїчного типу. Він містить матрицю ламп, керованих через дешифратор. Схожим чином діють і 7-сегментні індикатори (рис. 4.15 б), що підсвічують звичайними лампами. Показані індикатори випускають у мініатюрному виконанні з використанням світлодіодів і рідких кристалів. Світлодіоди можуть випромінювати світло різного кольору залежно від використовуваного матеріалу напівпровідника. Їх яскравість можна регулювати зміною напруги живлення.

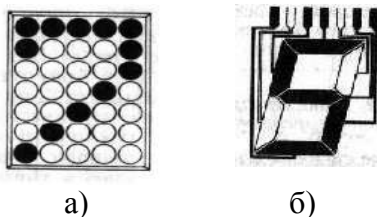


Рисунок 4.15 – Цифрові індикатори:

- а) мозаїчного типу;
- б) сегментного типу

Рідкокристалічні індикатори складаються з двох плоскопаралельних скляних пластин, між якими знаходиться шар рідких кристалів товщиною 12–20 мкм. Рідкий кристал це – речовина, що міститься в проміжній фазі між твердим тілом (має оптичні властивості твердого кристала) та ізотропною рідиною. Існує кілька тисяч різновидів рідких кристалів. На одній зі скляних пластин прозорим струмопровідним покриттям нанесений рисунок цифри, який являє собою конфігурацію у вигляді сегментів, за допомогою яких можна відтворити цифри від 0 до 9. На іншій пластині прозорим струмопровідним покриттям задано електрод, який є загальним для цифр. Обидві пластини покриті поверхнями, поверненими одна до одої.

Існують індикатори, які працюють під дією променя, що відбивається, та під дією променя, що проходить. У першому випадку на заднє скло індикатора наносять шар, що відбиває

промінь, у другому – за індикатором повинно бути використане додаткове джерело світла.

Під час подачі напруги рідкі кристали в зоні дії електричного поля втрачають прозорість, і якщо задня поверхня, що відбиває промінь, біла, то спостерігач бачить темну цифру на світлому фоні. Якщо задній відбивач має чорний колір і внутрішні поверхні корпусу також затемнені, то матово-світле зображення цифри буде добре помітно на чорному тлі.

4.4 Основні вимірювальні схеми вторинних приладів

Вимірювальний показувальний прилад є механізмом, положення рухомої частини якого залежить від значення вимірювальної величини. У приладах відбувається перетворення електричної величини (сили струму, напруги) у механічну силу.

Найбільш простим способом ввімкнення електричних датчиків у системи автоматичних пристроїв є безпосереднє під'єднання датчика до входу підсилювача автоматичного приладу.

За принципом дії електровимірювальні прилади поділяють на такі основні типи:

- прилади *магнітоелектричної* системи засновані на принципі взаємодії котушки зі струмом і зовнішнього магнітного поля, створюваного постійним магнітом;

- прилади *електродинамічної* системи засновані на принципі електродинамічної взаємодії двох котушок зі струмами, з яких одна нерухома, а інша рухома;

- прилади *електромагнітної* системи, в яких використовують принцип взаємодії магнітного поля нерухомої котушки зі струмом і рухомої залізної пластинки, намагніченої цим полем;

- *теплові* вимірювальні прилади, що використовують теплову дію електричного струму. Нагрітий струмом дріт подовжується, провисає, і внаслідок цього рухома частина приладу одержує можливість повернутися під дією пружини;

– прилади *індукційної* системи засновані на принципі взаємодії обертового магнітного поля зі струмами, що індукуються цим полем у рухомому металевому циліндрі;

– прилади *електростатичної* системи засновані на принципі взаємодії рухомих і нерухомих металевих пластин, заряджених різнойменними електричними зарядами;

– прилади *термоелектричної* системи, що являють собою сукупність термопари з будь-яким чутливим приладом, наприклад магнітоелектричної системи. Вимірювальний струм, який проходить через термопару, сприяє виникненню термоструму, що впливає на електромагнітний прилад;

– прилади *вібраційної* системи, засновані на принципі механічного резонансу віброуючих тіл. За заданої частоти струму найбільш інтенсивно вібрає той з якірців електромагніту, період власних коливань якого збігається з періодом вимушених коливань;

– *електронні* вимірювальні прилади – прилади, вимірювальні ланцюги яких містять електронні елементи. Їх використовують для вимірювань практично всіх електричних величин, а також неелектричних величин, попередньо перетворених в електричні.

За приклад розглянемо принцип дії *приладів магнітоелектричної* системи (рис. 4.16).

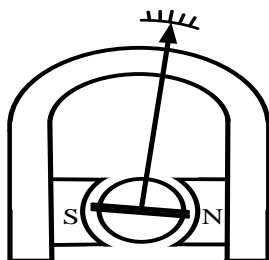


Рисунок 4.16 – Спрощена схема приладу магнітоелектричної системи

Прилади магнітоелектричної системи – це прилади, в яких використовують механічну взаємодію поля постійного магніту з

електричним струмом. Між полюсами постійного магніту розміщений із проміжком 2,0–2,5 мм круглий сталевий сердечник. У проміжку між сердечником і полюсами знаходиться прямокутна рамка, прикріплена на пружинках (на рис. 4.16 не показані), яка може вільно повертатися в проміжку. Струм, що проходить по рамці, взаємодіє з магнітним полем постійного магніту і створює крутний момент M , який прагне повернути рамку з прикріпленою до неї стрілкою. Пружинки, що закручуються, протидіють обертанню рамки. Це призводить до того, що кожному значенню сили струму відповідає одне цілком певне положення рамки.

Існує декілька модифікацій такого механізму, зокрема логометр, що містить дві схрещені котушки.

Перевагами приладів магнітоелектричної системи є висока чутливість щодо струму і незначний вплив сторонніх магнітних полів на показання приладів через наявність сильного постійного магніту.

Однак найбільшого поширення в промисловості одержали прилади, які називають *автоматичними компенсаторами*. Структурна схема автоматичного компенсатора наведена на рис. 4.17.

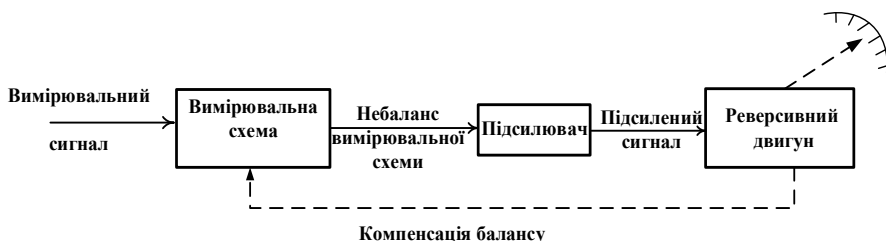


Рисунок 4.17 – Структурна схема автоматичного компенсатора

Унаслідок зміни вимірювального сигналу в вимірювальній схемі з'являється небаланс. Сигнал небалансу після підсилення надходить на реверсивний двигун, який відновлює рівновагу в вимірювальній схемі.

За типом вимірювальної схеми автоматичні компенсатори поділяють на такі:

- автоматичні потенціометри;
- автоматичні мости;
- прилади з диференційно-трансформаторною вимірною схемою.

Автоматичні потенціометри використовують для контролю малих значень напруги (ЕРС) постійного струму. За первинні датчики можна застосовувати термопари, п'єзоперетворювачі тощо. На рисунку 4.18 наведена схема під'єднання термопари до автоматичного потенціометра.

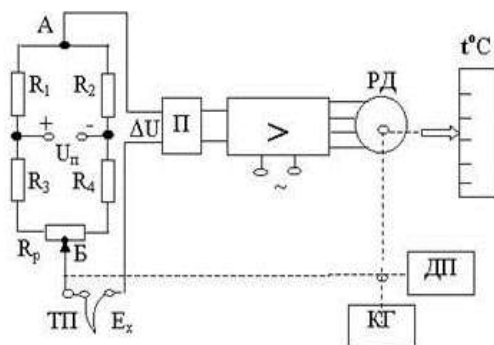


Рисунок 4.18 – Схема автоматичного потенціометра з термопарою

Вимірвальна схема складається з моста постійного струму зі стабілізованим джерелом живлення і послідовно з ним під'єднаної термопари (ТП). Для забезпечення можливості використання підсилювача змінного струму постійну напругу (ΔU), що знімають із вимірвальної схеми, за допомогою перетворювача (П) перетворюють у змінну. Зі схеми бачимо, що на вхід перетворювача подають напругу:

$$\Delta U = U_{AB} - E_x, \quad (4.9)$$

де U_{AB} – напруга, яку знімають із діагоналі моста;

E_x – напруга, яку виробляє термопара.

Функціонування приладу пояснює схема. Принцип компенсації тут реалізований методом формування в діагоналі

моста компенсувальної напруги (U_{AB}), ввімкненої назустріч термо-ЕРС (E_x).

На схемі показані додатковий перетворювач (ДП), сигнал якого може бути використаний у системі регулювання, і контактна група (КГ) для сигналізації, блокування і релейного регулювання, які вбудовують у деякі модифікації потенціометрів.

Автоматичні мости – призначені для вимірювання будь-яких технологічних параметрів, значення яких може бути перетворено в активний опір.

Мостову схему здійснюють як на постійному струмі (рис. 4.19 а), так і на змінному (рис. 4.19 б). Вона може бути двох видів: нерівноважна (незбалансована) і рівноважна (балансована). За нерівноважної мостової схеми для здійснення впливу або вимірювання використовують струм (напругу). За рівноважної мостової схеми нульового струму зміну опору одного плеча компенсує зміна опору іншого плеча до моменту зникнення струму. Визначальною величиною цієї схеми є компенсуючий опір.

Диференційно-трансформаторні прилади (див. п. 4.2.2) призначені для вимірювання будь-яких технологічних параметрів, значення яких може бути перетворено в лінійне переміщення.

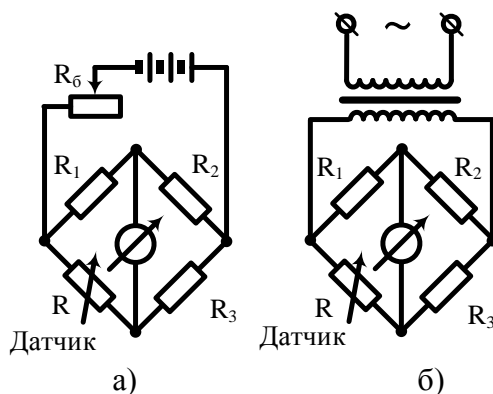


Рисунок 4.19 – Мостові схеми під'єднання датчика:
а) постійного струму;
б) змінного струму

5 ЗАКОНОДАВЧА МЕТРОЛОГІЯ

5.1 Забезпечення єдності та якості вимірювань

Вирішення важливих науково-технічних та народногосподарських завдань із випуску якісної продукції значною мірою залежить від єдності та достовірності вимірювань у державі.

Одним із головних завдань державної метрологічної служби є забезпечення єдності й точності вимірювань, підтримання одноманітності засобів вимірювальної техніки. Під *єдністю вимірювань* необхідно розуміти такий стан вимірювальної справи, за якої результати вимірювань виражають у законодавчо визначених одиницях і їх точність забезпечують із гарантованою достовірністю. Незалежно від методів, засобів вимірювання, часу і місця проведення результати вимірювань повинні бути однаковими. Сьогодні в Україні перебувають в експлуатації десятки мільйонів засобів вимірювальної техніки, щоденно виконують мільярди вимірювань, тому забезпечення єдності й достовірності вимірювань є надто важливою, клопіткою і повсякденною роботою.

Аналіз порівняно простих методів вимірювань показує, що похибки результатів вимірювань залежать значною мірою від засобів вимірювань, їх стану, класу точності, кваліфікації та підготовки персоналу тощо. Досягнути високої точності вимірювань неможливо без забезпечення одноманітності засобів вимірювальної техніки, тобто такого їх стану, коли вони відградуйовані у взятих одиницях, а їх метрологічні характеристики відповідають нормам. Засоби вимірювань повинні бути своєчасно відремонтовані, повірені у метрологічних установах і мати належне обслуговування. Крім того, на точність вимірювань значною мірою впливають методи вимірювань, зовнішні чинники, фізіологічний стан спостерігача та багато інших факторів.

Під час використання сучасних складних методів вимірювання засоби вимірювань не завжди визначають сумарну похибку вимірювань, оскільки на похибку більше впливають

недосконалість методу вимірювання, помилки експериментатора та зміна умов проведення вимірювання. Тому важливо забезпечити одноманітність засобів вимірювань, єдність вимірювань, умови проведення експерименту, а також чітко визначити мету та послідовність опрацювання результатів експерименту за допомогою ЕОМ.

Розроблений комплекс правил регламентує порядок підготовки, проведення й опрацювання результатів вимірювань (правила законодавчої метрології). Встановлені еталонна база і комплекс зразкових засобів вимірювань для передачі розміру одиниць фізичних величин від еталонів зразковим і робочим засобам вимірювань (повірочні схеми), а також контроль за виконанням правил і норм законодавчої метрології та своєчасною перевіркою й атестацією всіх засобів вимірювальної техніки в державі.

Отже, забезпечення єдності вимірювань як діяльності, спрямованої на досягнення і підтримку єдності вимірювань в Україні є досить складним і відповідальним завданням, яке й визначає головний зміст метрології і метрологічних служб держави. Виходячи з цього, *метрологічне забезпечення* – це встановлення і застосування метрологічних норм і правил, а також розроблення, виготовлення та застосування технічних засобів, необхідних для досягнення єдності та потрібної точності вимірювань.

Науковою основою метрологічного забезпечення є метрологія – наука про вимірювання, про методи та засоби забезпечення єдності вимірювань і способи досягнення потрібної точності.

Технічними основами метрологічного забезпечення є: система державних одиниць фізичних величин, система передачі розмірів одиниць фізичних величин від еталонів усім засобам вимірювань, система розроблення, постановки на виробництво і випуску в обіг робочих засобів вимірювань необхідної точності для промисловості, система обов'язкових державних і відомчих повірок або метрологічної атестації засобів вимірювань, система стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів,

система стандартних довідкових даних про фізичні константи та властивості речовин і матеріалів тощо.

Під час кожного вимірювання необхідно виявити можливі джерела систематичних похибок і вжити заходи щодо їх усунення або визначити їх величину. Для виявлення систематичних похибок проводять порівняльні вимірювання однієї величини різними методами.

Вилучення випадкових похибок проводять статистичними методами.

Похибки засобів, що використовують, можуть призводити до помилкових оцінювань якості продукції, тому задані характеристики застосовуваних для контролю засобів вимірювальної техніки повинні зберігатися впродовж усього часу експлуатації. З цією метою проводять періодичні перевірки засобів вимірювань, тобто встановлюють придатність цих засобів до застосування на підставі експериментально визначених метрологічних характеристик і контролю їх відповідності встановленим вимогам.

Певірка – порівняння показань приладу, що перевіряють, з показаннями зразкового приладу. Клас точності зразкового приладу повинен бути в 3-4 рази вищий ніж клас точності приладу, що певіряють. Основною метрологічною характеристикою засобу вимірювань, яку визначають під час певірки, є його похибка.

Результати певірки засобів вимірювальної техніки, визнаної придатною до подальшого застосування, оформляють свідченням (сертифікатом) про певірку, нанесенням певірочного тавра або іншими способами, встановленими нормативно-технічними документами на методи і засоби певірки.

Певірку виконують державні органи (метрологічні служби), які мають на це право в установленому порядку.

Питання, пов'язані зі стандартизацією та сертифікацією в Україні наведенні у додатку В.

6 СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

6.1 Структура систем автоматичного контролю

Зазвичай для кожного виробничого процесу існує певна сукупність значень параметрів, що називають *нормальним технологічним режимом*, за якого кількість і якість одержуваних продуктів з певної сировини майже незмінні.

Відхилення параметрів від їх значень за нормального технологічного режиму призводить до погіршення результатів виробничого процесу. Щоб в той чи інший спосіб привести його до нормального технологічного режиму, потрібен ручний або автоматичний вплив на органи керування. Відповідність режиму процесу нормальному технологічному режиму визначають контролем. Для контролю здійснення процесу застосовують автоматичні прилади. Водночас сам контроль називають автоматичним. Автоматичний контроль виробництва є складовою частиною автоматизації виробничих процесів.

Система автоматичного контролю складається з об'єкта контролю і різних пристроїв, що виконують функції вимірювання. Під *об'єктом контролю* розуміють агрегат або процес, у якому вимірюють одну або кілька величин.

Здебільшого система вимірювання має первинний вимірювальний перетворювач, лінію зв'язку і вторинний прилад (рис. 6.1).

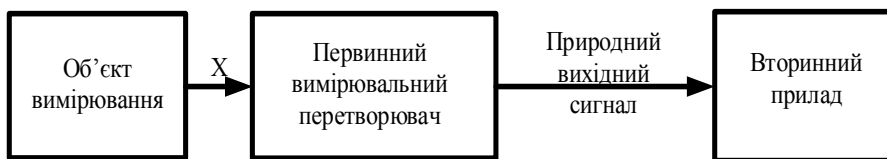


Рисунок 6.1 – Структурна схема системи автоматичного контролю

Первинний вимірювальний перетворювач (ПВП) зазвичай встановлюють на об'єкті вимірювання і використовують для перетворення вимірювальної величини X у вихідний сигнал, зручний для передавання каналом зв'язку. Прикладом ПВП може бути термопара в ланцюзі термоелектричного термометра. Конструктивно виділений ПВП, що видає сигнали вимірювальної інформації, називають *датчиком*.

Вторинний прилад – пристрій, що приймає сигнал від первинного перетворювача і виражає його в зручному для спостереження вигляді за допомогою відлікового пристрою.

Канал зв'язку використовують для передавання сигналу від первинного перетворювача до вторинного приладу. Якщо передають електричний сигнал, то за канал зв'язку використовують електричні дроти і кабель. Для пневматичного або гідравлічного сигналу використовують трубки з різних матеріалів.

Вимірювальна величина X надходить на вхід первинного вимірювального перетворювача (датчика), де її перетворюють у вихідний сигнал, зручний для передавання каналом зв'язку у вторинний прилад.

Залежно від типу вимірювальної фізичної величини, принципу дії первинного вимірювального перетворювача і відстані, на яку необхідно передати інформацію, до складу системи автоматичного контролю можуть бути внесені, крім первинних вимірювальних перетворювачів, проміжний, нормуючий та той, що передає, вимірювальні перетворювачі.

6.2 Класифікація систем автоматичного контролю

За призначенням системи автоматичного контролю поділяють на системи місцевого контролю, дистанційного контролю і телевимірювальні системи.

Системи місцевого контролю дозволяють безпосередньо визначити значення контрольованої величини за шкальними пристроями приладів, записувати значення цієї величини в часі на діаграмному папері або здійснювати сигналізацію безпосередньо на самому об'єкті контролю.

Автоматичний контроль можна здійснювати і на відстані від контрольованого об'єкта, подовживши лінію зв'язку між датчиком і вторинним приладом. У цьому разі результат вимірювання перетворюють у пропорційний електричний або пневматичний сигнал, який містить інформацію про величину вимірювального параметра і за відповідної лінії зв'язку передає її на вхід вторинного приладу, де здійснюють перетворення сигналу, переданого по лінії зв'язку внаслідок вимірювання. Таку систему автоматичного контролю називають *дистанційною*.

Залежно від виду використовуваної енергії дистанційні системи поділяють на пневматичні, електричні та гідравлічні.

Схеми дистанційного контролю з передаванням сигналів у вигляді тиску стисненого повітря знайшли широке застосування на підприємствах хімічної та нафтохімічної промисловості. Водночас відстань між первинним і вторинним приладами досягає 300 м, що цілком достатньо для централізації контролю об'єктів у межах одного виробництва або однієї технологічної установки. Електричні схеми використовують значно рідше, а гідравлічні системи не застосовують взагалі.

Дистанційні системи дозволяють здійснювати контроль за роботою обладнання і ходом виробничого процесу з приміщення оператора. Зазвичай у цьому приміщенні встановлюють щит керування, на якому розміщують вторинні прилади.

Телевимірювальні системи контролю забезпечують передавання результатів вимірювання різних параметрів технологічних процесів на далекі відстані й використовують для централізованого контролю на великих підприємствах і групах підприємств.

Передавання інформації в телевимірюванні найчастіше здійснюють у вигляді електричних сигналів за загальною схемою, що зображена на рисунку 6.2.

Телевимірювальні системи контролю містять шифратори і дешифратори для перетворення сигналу, що передають у дискретній формі.

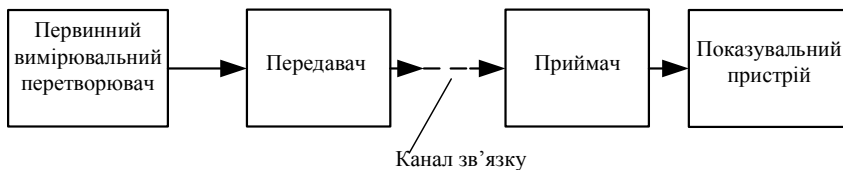


Рисунок 6.2 – Загальна схема телеметричного пристрою

У таких системах результат вимірювання за допомогою перетворювача в первинному приладі перетворюють у кодовані дискретні сигнали, які передають каналом зв'язку. У вторинному приладі, встановленому на іншому кінці каналу зв'язку, ці сигнали перетворюють у результат вимірювання і фіксують у цифровій або аналоговій формі.

Як місцеві, так і дистанційні системи автоматичного контролю можуть бути одноточковими або багатоточковими.

Одноточковими (одновимірними) називають системи, в яких до одного вимірювального пристрою або вторинного приладу підводять сигнал лише від одного вимірювального пристрою або первинного приладу. В таких системах контролюють лише один параметр в одній точці об'єкта.

Багатоточковими (багатовимірними) називають системи, в яких до одного вимірювального пристрою або вторинного приладу підводять сигнал від декількох вимірювальних пристроїв або первинних приладів. У них контролюють декілька параметрів в одній точці об'єкта або один у декількох точках.

7 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Температурою називають ступінь нагрівання речовини. Це твердження про температуру ґрунтується на теплообміні між двома тілами, що перебувають у тепловому контакті. Тіло, більше нагріте, що віддає тепло, має і більш високу температуру, ніж тіло, що сприймає тепло. За відсутності передавання тепла від одного тіла до іншого, тобто в стані теплової рівноваги, температури тіл однакові.

7.1 Класифікація приладів для вимірювання температури

Прилади для вимірювання температури поділяють залежно від використовуваних ними фізичних властивостей речовин на такі групи:

- термометри розширення ($-190\dots+650\text{ }^{\circ}\text{C}$), що базуються на властивості тіл змінювати під дією температури свій об'єм;
- манометричні термометри ($-160\dots+200\text{ }^{\circ}\text{C}$), що працюють за принципом зміни тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкненому (не змінному) об'ємі під час нагрівання або охолодження цих речовин;
- термометри опору ($-200\dots+650\text{ }^{\circ}\text{C}$), що ґрунтуються на властивості металевих провідників під час нагрівання змінювати їх електричний опір;
- термоелектричні термометри ($-50\dots+1\ 800\text{ }^{\circ}\text{C}$), які працюють на властивості різних металів і сплавів утворювати в парі (спаї) термоелектрорушійну силу, що залежить від температури спаю;
- пірометри ($-30\dots+6\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$), які працюють за принципом вимірювання випромінюваної енергії нагрітими тілами.

7.2 Термометри розширення

Фізичну властивість тіл змінювати свій об'єм залежно від нагрівання широко використовують для вимірювання температури. На цьому принципі заснований пристрій *рідинних скляних* і

дилатометричних термометрів, які з'явилися дуже давно і використовувалися для створення перших температурних шкал.

У *рідинних термометрах*, побудованих на принципі теплового розширення рідини в скляному резервуарі, за робочі речовини використовують ртуть і органічні рідини – етиловий спирт, толуол тощо.

Найширшого застосування набули ртутні термометри, що мають порівняно з термометрами, заповненими органічними рідинами, істотні переваги: великий діапазон вимірювання температури, за якого ртуть залишається рідкою, незмочення скла ртуттю, можливість заповнення термометра хімічно чистою ртуттю через легкість її одержання тощо. За нормального атмосферного тиску ртуть перебуває в рідкому стані за температур від -39°C (точка замерзання) до 357°C (точка кипіння) і має середній температурний коефіцієнт об'ємного розширення $0,18 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Термометри з органічними рідинами здебільшого придатні лише для вимірювання низьких температур у межах до 100°C .

Рідинні термометри, виготовлені зі скла, є місцевими показувальними приладами. Вони складаються з резервуара з рідиною, капілярної трубки, приєднаної до резервуара і закритої із протилежного кінця, шкали і захисної оболонки.

7.2.1 Ртутні термометри

Ртутні термометри за призначенням поділяють на промислові (технічні), лабораторні й зразкові. Основна похибка ртутних термометрів залежить від діапазону показань і ціни поділки шкали, зі збільшенням яких вона зростає. Внаслідок невеликого відхилення видимого коефіцієнта розширення ртуті в склі під час зміни температури ртутні термометри мають майже рівномірну шкалу.

Недоліками ртутних термометрів є їх крихкість, неможливість дистанційного передавання і автоматичного запису показань, значна інерційність і труднощі відліку через нечіткість шкали і поганої видимості ртуті в капілярі. Все це значною мірою обмежує їх застосування, залишаючи за ними, головним чином, сферу місцевого контролю і лабораторні вимірювання.

7.2.2 Дилатометричні термометри

До дилатометричних термометрів належать стрижневий і пластинчастий (біметалічний) термометри, дія яких заснована на відносному подовженні під впливом температури двох твердих тіл, що мають різні температурні коефіцієнти лінійного розширення.

Стрижневий термометр (рис. 7.1 а) має закриту з одного кінця трубку 1, що розміщена у вимірювальному середовищі й виготовлена з матеріалу з більшим коефіцієнтом лінійного розширення. У трубку вставлений стрижень 2, що прилягає до її дна важелем 3, з'єднаним із пружиною 4. Стрижень виготовлений із матеріалу з малим коефіцієнтом розширення. Під час зміни температури трубка змінює свою довжину, що призводить до переміщення в ній стрижня, який зберігає майже постійні розміри і з'єднаний за допомогою важеля 3 із вказівною стрілкою приладу.

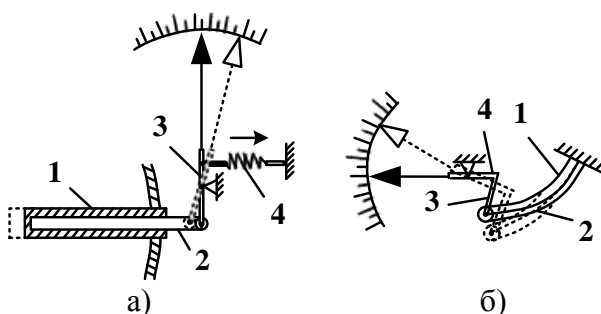


Рисунок 7.1 – Дилатометричні термометри:
а) стрижневий; б) пластинчастий

Пластинчастий термометр (рис. 7.1 б) складений із двох вигнутих і спаяних між собою по краях металевих смужок, з яких смужка 1 має великий коефіцієнт лінійного розширення, а смужка 2 – малий. Отримана пластинка змінює залежно від температури ступінь свого вигину, величину якого за допомогою тяги 3, важеля 4 і з'єднаної з ним стрілки зазначають за шкалою приладу. Під час збільшення температури пластинка вигинається увік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення.

Дилатометричні термометри не знайшли поширення як самостійні прилади, а використовують, головним чином, як чутливі елементи в сигналізаторах температури. Потрібно відзначити, що пластинчасті термометри іноді застосовують для компенсації впливу змінної температури навколишнього повітря на показання інших приладів, у які вони вбудовані.

7.3 Манометричні термометри

Конструктивно вони складаються з теплоприймача – балончика 1, в якому знаходиться термометрична речовина, манометра 3 і металевого капіляра, що їх поєднує 2 (рис. 7.2).

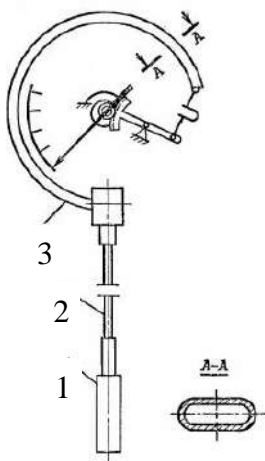


Рисунок 7.2 – Схема манометричного термометра

Всю систему приладу (термобалон, капіляр, манометрична пружина) заповнюють робочою речовиною. Щодо робочої речовини розрізняють газові, рідинні та парорідинні (конденсаційні) манометричні термометри.

Термобалон розміщують у зоні вимірювання температури. Під час нагрівання термобалона тиск робочої речовини всередині замкненої системи збільшується. Збільшення тиску

сприймає манометрична трубка (пружина), яка через передавальний механізм впливає на стрілку або перо приладу.

Термобалон приладу зазвичай виготовляють із нержавіючої сталі, а капіляр – з мідної або сталеві трубки внутрішнім діаметром 0,1–0,5 мм. Залежно від призначення приладу довжина капілярної трубки може бути різною (до 60 м). Для захисту від механічних пошкоджень капіляр розміщують у захисну оболонку.

Манометричні термометри широко застосовують у хімічних виробництвах. Вони прості за будовою, надійні в роботі й за відсутності електроприводу діаграмного паперу – вибухо- і пожежобезпечні.

Шкалу манометра градуюють в одиницях температури. Манометричними термометрами вимірюють температуру в межах від -150°C до $+600^{\circ}\text{C}$.

Під час вимірювання температури агресивних середовищ або продуктів у апаратах, що працюють під час високого тиску, термобалон манометричного термометра встановлюють у захисній гільзі.

7.4 Термоелектричні термометри

Первинним перетворювачем (датчиком) термоелектричного термометра є термопара, що складається з двох провідників або напівпровідників А і Б з різною роботою виходу електронів. Принцип дії термопари заснований на термоелектричному ефекті, який полягає в тому, що в замкненому ланцюзі, який складається з двох або декількох різнорідних провідників, виникає електричний струм (термо-ЕРС), якщо хоча б два місця з'єднання (спаю) провідників мають різну температуру. Для одержання порівняно високих значень термо-ЕРС провідники підбирають так, щоб у парі один із них створював додатну, а інший – від'ємну термо-ЕРС.

Один із спаїв із температурою t є гарячим або робочим, а температуру t_0 іншого спаю (холодного) підтримують сталою.

Для під'єднання вимірювального приладу необхідно розімкнути ланцюг термопар (рис. 7.3).

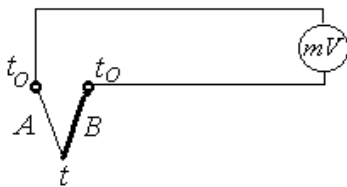


Рисунок 7.3 – Схема під'єднання термопар

Як вимірювальні прилади (вторинні) в термоелектричних термометрах використовують мілівольтметри і потенціометри.

Термоелектричні термометри, що набули практичного застосування, поділяють за матеріалами термоелектродів на дві групи: із благородних (платина, платинородій) і неблагородних металів або сплавів (хромель-алюмелевий та хромель-копелевий сплави). Термометри з термоелектродами із благородних металів і сплавів застосовують в основному для вимірювання температури вищої ніж $1\ 000\ ^\circ\text{C}$, тому що вони мають високу термостійкість.

Перевагами термоелектричних термометрів є: великий діапазон вимірювання, висока чутливість, незначна інерційність, відсутність стороннього джерела електричного струму і легкість здійснення дистанційного передавання показань.

7.5 Термометри опору

Для вимірювання температури широко використовують електричні методи, засновані на зміні електричної провідності металів (термометри опору) і напівпровідників (термістори).

Металеві і напівпровідникові резистори, що використовують для вимірювання температури за зміною їх опору, називають також терморезисторами.

На рисунку 7.4 показана одна з конструкцій металевого термометра опору. Для виготовлення таких термометрів використовують хімічно чисті метали, що мають додатний високостабільний температурний коефіцієнт опору, лінійну залежність опору від температури, гарну відтворюваність властивостей та інерційність впливам довкілля. До таких металів

насамперед належить платина. Також поширеними є мідні термометри опору, а також вольфрамові й нікелеві.

На відміну від металевих напівпровідникові резистор-термістори – характеризують експоненціальною залежністю опору від температури. Одна з конструкцій термісторного перетворювача температури наведена на рисунку 7.5. Завдяки малим порівняно з термометрами опору розмірами термістори менш інерційні. Однак нелінійність характеристики і технологічний розкид параметрів термісторів ускладнюють отримання лінійних шкал термометрів і їх взаємозамінність, необхідну під час широкого застосування термометрів. Щоб лінеаризувати шкалу термісторного термометра, використовують спеціальні коригувальні ланцюги.

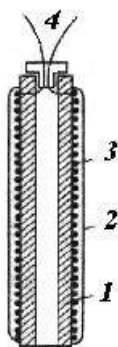


Рисунок 7.4 – Конструкція металевого термометра опору:

- 1 – керамічний каркас;
- 2 – покриття із глазури;
- 3 – біфілярна обмотка проводом діаметром 0,03 мм або 0,05 мм;
- 4 – вивідні кінці

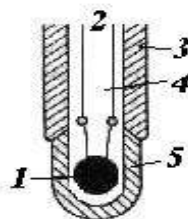


Рисунок 7.5 – Конструкція термістора:

- 1 – термістор;
- 2 – з'єднувальні провідники;
- 3 – металевий кожух;
- 4 – кварцовий пісок;
- 5 – скляний наконечник

Температурна межа вимірювань термістора на оксидній кераміці становить 300°C , тоді як межа платинового термоопору досягає 850°C .

Для вимірювання опорів у техніці широко застосовують мостові схеми: врівноважений і неврівноважений міст, а також логометри.

7.6 Пірометри

Пірометри застосовують для вимірювання температури тіл діапазоном від -30°C до $+6\,000^{\circ}\text{C}$. Дія цих приладів заснована на залежності теплового випромінювання нагрітих тіл від їх температури і фізико-хімічних властивостей. На відміну від термометрів первинний перетворювач пірометра не підлягає впливу високої температури і не змінює температурне поле, тому що перебуває поза вимірювальним середовищем.

Із підвищенням температури нагрітого тіла інтенсивність його теплового випромінювання у вигляді електромагнітних хвиль різної довжини швидко зростає. Під час нагрівання до 500°C тіло випромінює невидимі інфрачервоні промені великої довжини хвилі, проте подальше збільшення температури викликає появу видимих променів меншої довжини, завдяки яким тіло починає світитися. Спочатку розпечене тіло має темно-червоні кольори. Через підвищення температури і появу променів, довжина хвилі яких поступово зменшується, у випромінненні з'являються червоний, жовтогарячий, жовтий і, нарешті, білий кольори, що складаються з комплексу променів різної довжини хвилі.

Одночасно зі збільшенням температури нагрітого тіла і зміною його кольору сильно зростає інтенсивність часткового (монохроматичного або одноколірного) випромінювання (яскравість) для даної ефективної довжини хвилі, а також помітно збільшується інтенсивність сумарного випромінювання (радіація) тілом енергії, що дозволяє використовувати ці властивості для вимірювання температури нагрітих тіл.

Тому за принципом вимірювання пірометри можна поділити на такі види:

а) яскравісні (оптичні), засновані на вимірюванні яскравості нагрітого тіла;

б) кольорові (пірометри спектрального відношення), засновані на вимірюванні розподілу енергії в спектрі теплового випромінювання тіла;

в) радіаційні, засновані на вимірюванні потужності випромінювання нагрітого тіла.

7.6.1 Оптичні пірометри

Оптичні пірометри широко застосовують у лабораторних і виробничих умовах для вимірювання температур вищих ніж 800 °С. Принцип дії оптичних пірометрів заснований на порівнянні спектральної яскравості тіла зі спектральною яскравістю градуйованого джерела випромінювання. Як чутливий елемент, що визначає збіжність спектральних яскравостей у візуальних оптичних пірометрах, використовують очі людини. Найпоширенішим є оптичний пірометр зі зникаючою ниткою, схема якого наведена на рисунку 7.6 а. Для вимірювання температури об'єктів приладу спрямовують на об'єкт вимірювання ОВ так, щоб спостерігач на його фоні побачив в окулярі 7 нитку оптичної лампи 4.

Порівняння спектральних яскравостей об'єкта вимірювання і нитки лампи 4 здійснюють зазвичай за довжини хвилі, що дорівнює 0,65 мкм, для цього перед окуляром установлений червоний світлофільтр 6. Вибір червоного світлофільтра обумовлений тим, що око людини сприймає через цей фільтр лише частину спектра його пропускання, що наближається до монохроматичного променя. Крім цього, застосування червоного світлофільтра дозволяє знизити нижню межу вимірювання пірометра. Діафрагми (вхідна 3 і вихідна 5) обмежують вхідний і вихідний кути пірометра, оптимальні значення яких дозволяють забезпечити незалежність показань приладу від зміни відстані між об'єктом вимірювання і об'єктивом.

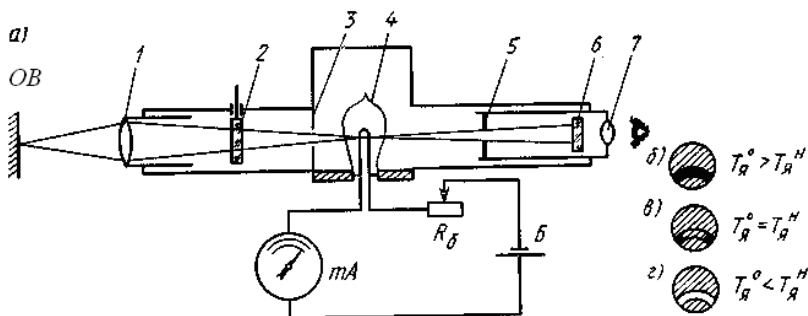


Рисунок 7.6 – Схема візуального оптичного пірометра

Спостерігаючи за зображенням нитки лампи на фоні об'єкта вимірювання (світлий фон – темна нитка (рис. 7.6 б), темний фон – світла нитка (рис. 7.6 г)) за допомогою реостата змінюють силу струму, що проходить від батареї Б до нитки лампи, доти, поки яскравість нитки не стане такою, що дорівнює видимій яскравості об'єкта вимірювання. Під час досягнення зазначеної рівності нитка «зникає» на фоні зображення об'єкта вимірювання (рис. 7.6 в). У цей момент за шкалою міліамперметра, попередньо градуйованим за значеннями температури яскравості нитки лампи, визначають яскравісну температуру об'єкта. За обмірюваною яскравісною температурою і відповідними виразами розраховують істинну температуру об'єкта.

Оптичні пірометри призначені для вимірювання температур в інтервалі від 800°C до $6\,000^{\circ}\text{C}$ і мають різні модифікації з різними межами вимірювання. Клас точності оптичних пірометрів 1,5-4,0.

На результати вимірювання впливають наявність у навколишньому повітрі пилу, диму і великого вмісту двоокису вуглецю. Крім того, будь-яке забруднення оптичної системи пірометрів також приводить до збільшення похибки вимірювання.

Перевагами оптичних пірометрів є порівняно висока точність вимірювання, компактність приладу і простота роботи з ними. До недоліків варто віднести потребу в джерелі живлення, неможливість стаціонарного вимірювання температури і

автоматичного її запису, а також суб'єктивність методу вимірювання, заснованого на спектральній чутливості очей спостерігача.

Багато реальних тіл, такі, як кераміка, оксиди металів, вогнестійкі вироби, графіт та інші є практично сірими. У цьому зв'язку переваги колірного методу вимірювання очевидні, тому що колірна температура багатьох твердих і рідких тіл значно менше відрізняється від істинної температури, ніж яскравісна або радіаційна.

Вимірювання можуть бути автоматизовані з використанням фотоприймального пристрою та системи автоматичного зрівноважування.

7.6.2 Кольорові пірометри

Чим вища температура й інтенсивніше тепловий рух носіїв заряду в тілі об'єкта, тим на більш високих частотах іде випромінювання. З цього виходить, що під час збільшення температури разом із ростом інтенсивності світла, яку зір сприймає за яскравість, змінюється співвідношення різних частотних складових.

Отже, колір нагрітого об'єкта залежить від його температури. Так, об'єкти, які мають температуру 700–800 °С світяться темно-помаранчевим світлом; за температури 1 000–1 200 °С світло стає яскраво-помаранчевим, поступово переходячи в жовте. За 2 000 °С наше око сприймає колір за яскраво-жовтий, а після 2 500 °С світіння наближається до білого кольору. Прилади, засновані на використанні цього явища, називають *кольоровими пірометрами*. Зазвичай вони визначають температуру щодо яскравостей для фіксованих довжин хвиль λ_i (кольорів) випромінювання. Це явище однозначно залежить від температури.

Функціональна схема кольорового пірометра наведена на рисунку 7.7. Такі пірометри вимірюють температуру кольору об'єкта щодо інтенсивностей випромінювання на двох певних ділянках спектра. Основна перевага таких пірометрів полягає в незалежності їх показань від випромінювальної здатності об'єкта, а також від наявності диму, пилу і випарів у просторі між об'єктом і пірометром.

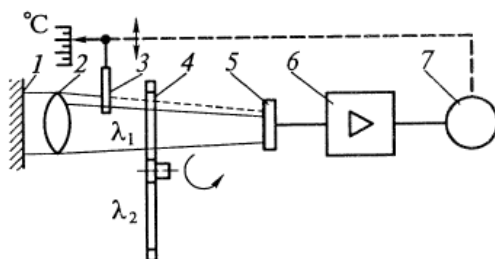


Рисунок 7.7 – Функціональна схема колірного пірометра:

- 1 – об'єкт вимірювання; 2 – об'єктив; 3 – фільтр;
- 4 – обтюратор; 5 – фотоелемент; 6 – підсилювач;
- 7 – реверсивний двигун

Світловий потік від об'єкта вимірювання 1 до фотоелемента 5 перетинає обтюратор 4 з двома світлофільтрами, що відповідають двом довжинам хвиль λ_1 і λ_2 . Це викликає появу на виході фотоприймача змінного сигналу, амплітуда якого пропорційна відношенню спектральних яскравостей вхідних потоків світла. Отже, амплітуда змінної складової вихідного сигналу залежить від температури поверхні об'єкта контролю. Змінну складову вихідного сигналу фотоприймача посилюють у підсилювачі 6 і подають на реверсивний двигун 7, який переміщує врівноважуваний фільтр 3 доти, поки не стануть однаковими інтенсивності випромінювання на обох довжинах хвиль. У положенні рівноваги змінна складова вихідного сигналу фотоприймача зникає, а переміщення фільтра 3 є мірою вимірювальної температури. Діапазон вимірювання кольорового пірометра становить від 1 000 °С до 2 500 °С. Під час використання інфрачервоних фотоприймачів нижня межа

температурного діапазону може бути зменшена до 20 °С. Перевагою таких приладів є те, що для «сірих» тіл вимірюють дійсну температуру. Сірим називають тіло, ступінь чорноти поверхні якого можна взяти постійною в широкому діапазоні довжин хвиль випромінювання.

7.6.3 Радіаційні пірометри (повного випромінювання)

Вимірювання температури пірометрами сумарного випромінювання засновано на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл. Прилади такого типу широко використовують для вимірювання низьких температур від 20 °С до 100 °С. Приймачі спільного випромінювання відрізняються тим, що їх спектральна чутливість постійна в широкому діапазоні довжин хвиль – від дальньої інфрачервоної області до ближньої ультрафіолетової. Теплові промені, які потрапляють на пірометр, концентрують за допомогою збірної лінзи на термочутливому елементі, що складається з невеликої термобатарей. За ступенем нагрівання останньої роблять висновок про температуру випромінювача. Для збільшення поглинальної здатності чутливі поверхні приймачів випромінювання фарбують у чорний колір. Для зменшення тепловідведення приймач розміщують у вакуумованому або газонаповненому корпусі. Як приймач застосовують термобатарей або болометри.

Термобатарей – це послідовно з'єднані термоелектричні перетворювачі (до 20 термопар). Їх гарячі спаї 1 (рис. 7.8) розміщують на вузькій ділянці затемненої поверхні 2, на яку фокусують випромінювання. Болометри – це термометри опору, виготовлені або з фольги провідних матеріалів, або з напівпровідників (термісторів). Теплові швидкодіючі індикатори виконують у вигляді тонкошарової термопари або болометра, в яких активний шар має добрий тепловий контакт з основою. Це дає можливість підвищити швидкодію.

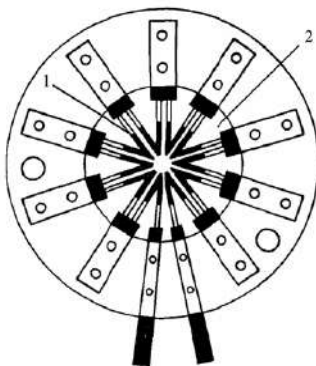


Рисунок 7.8 – Конструкція термобатареї

Як вторинний прилад пірометра можуть використовувати мілівольметр або автоматичний потенціометр.

Пірометр сумарного випромінювання порівняно з візуальним пірометром характеризується низкою переваг: об'єктивністю методу вимірювання, відсутністю стороннього джерела живлення та можливістю застосування дистанційної передачі показань на вторинні прилади, але поступається йому в точності вимірювання.

Шкала пірометра, що градуйована в градусах Цельсія радіаційної температури, має нерівномірні розподіли шкали сильно стиснені на початку та розтягнені наприкінці шкали.

Для вимірювання температур вищих ніж $3\,000\,^{\circ}\text{C}$ методи пірометрії є практично єдиними, тому що вони безконтактні, тобто не вимагають безпосереднього контакту датчика приладу з об'єктом вимірювання. Теоретично верхня межа вимірювання температури пірометрами необмежена.

7.7 Тепловізори

Тепловізор – оптико-електронний прилад для візуалізації температурного поля та вимірювання температури, що працює в інфрачервоній частині електромагнітного спектра. Розподіл температури відображають на дисплеї як кольорову картинку, де різним температурам відповідають різні кольори. Вивчення теплових зображень називають *термографією*. Тепловізор може використовуватися як прилад для безконтактного вимірювання температури об'єктів і температурних полів.

Сучасний тепловізор має досить просту будову: об'єктив, тепловізійна матриця (чутливий елемент) і електронний блок

оброблення сигналу. Саме спеціальна матриця, яка здатна вловлювати хвилі термального інфрачервоного спектра, є основою тепловізора. Матриця – це ґратка мініатюрних детекторів, що сприймає інфрачервоні сигнали і перетворює їх в електричні імпульси, які після підсилення перетворюють у відеосигнал. Розмір фотоелектричних матриць зазвичай становить 640×480 пікселів. Для фокусування та одержання чіткої картинки використовують спеціальну лінзу.

Тепловізори поділяють на дві категорії: з охолоджувальною і неоохолоджувальною матрицею.

Охолоджувані тепловізори – найчутливіші, дорогі та масивні, бо для охолодження використовують криогенні технології, що дозволяють охолоджувати матрицю до температур -170 – 210°C . Завдяки цьому можна одержати надзвичайно високу точність: такі тепловізори розрізняють об'єкти з різницею температур у $0,1^{\circ}\text{C}$ та забезпечують дальність зору в 300 метрів. Кращі охолоджувальні датчики здатні реагувати на одиничні фотони і мають час реакції менше ніж 1 мікросекунда. Недоліки камер з охолоджуваними матрицями – велике енергоспоживання і короткий термін служби криогенної системи, велика вартість, а також те, що охолодження матриці до робочої температури займає зазвичай кілька хвилин.

Неохолоджувані тепловізори на порядок дешевші та працюють за кімнатної температури, що дозволяє зробити їх компактними, тихими, з миттєвою активацією, але вони мають значно меншу чутливість. Переваги таких тепловізорів у тому, що вони починають працювати відразу після ввімкнення, мають довгий термін служби і низьке споживання енергії. Простота і дешевизна неоохолоджуваних тепловізорів зробили їх масовими.

7.7.1 Принцип дії тепловізорів

Принцип дії тепловізора заснований на перетворенні випромінення інфрачервоного спектра у видимий діапазон світлового випромінення. Кожне нагріте тіло випускає теплове випромінювання, інтенсивність і спектр якого залежать від властивостей тіла і його температури. Принцип дії тепловізора такий: інфрачервоне (теплове) випромінювання від

досліджуваного об'єкта через оптичну систему передають на приймач, що являє собою матрицю термодетекторів. Одержані з фотоматриці сигнали потім перетворюють на електричні імпульси, за допомогою електронного блока вимірювання, реєстрації і математичного оброблення оцифровують і відображають на екрані комп'ютера або дисплеї тепловізора. Водночас синій колір зазвичай означає холодні ділянки, а червоний – гарячі.

Оскільки матриця під час своєї роботи також нагрівається та випромінює інфрачервоне світло, вона створює зайвий шум. Тому 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 випромінювання стає просто непомітною.

Головна проблема тепловізорів – об'єктиви. Оскільки звичайне оптичне скло непрозоре в інфрачервоному діапазоні, тобто поглинає хвилі інфрачервоного спектра, оптику тепловізорів роблять зі спеціальних матеріалів. Найчастіше це германій, але він дорогий, тому іноді використовують халькогенідне скло, селенід цинку або навіть поліетилен. Зараз вартість об'єктива становить приблизно 45 % вартості всього приладу, ще 45 % – матриця.

7.7.2 Сфери застосування тепловізорів

Тепловізори застосовують для контролю стану об'єктів і технологічних процесів у різних галузях промисловості, а також під час проведення наукових досліджень.

Сфери застосування тепловізорів: енергетика і енергоаудит, машинобудування, будівництво, нафтова і хімічна промисловість, транспорт тощо. За допомогою тепловізора можна оперативно визначити передумови виникнення і наявність дефектів у нафто- і газопроводах, у теплотрасах, водопроводах і електричних з'єднаннях. Своєчасне виявлення за допомогою тепловізора температурних аномалій, що відбивають невидимі небезпечні процеси навколо нас, дозволить вжити заходів для усунення причин можливих аварій.

Розглянемо приклади використання тепловізорів.

1. Тепловізор у будівництві будинків і котеджів:

- виявлення порушення теплоізоляції та інших тепловтрат;
- виявлення дефектів стиків панелей, тріщин, погіршення теплоізоляційних властивостей, ділянок інфільтрації води, обривів арматур, ділянок більш пізнього ремонту.

2. Тепловізор в енергетиці:

- тепловізійний моніторинг ліній електропередач;
- виявлення дефектних контактів з'єднань комутаційних апаратів;
- виявлення засмічення теплообмінників на теплотрасах;
- виявлення проблем у теплоізоляції турбін, паро- і трубопроводів.

3. Тепловізор в енергозбереженні:

- визначення теплоізоляційних властивостей матеріалів;
- діагностика огорожувальних конструкцій;
- виявлення тепловтрат у внутрішніх приміщеннях і зовні будинків і споруджень.

4. Тепловізор у хімічній промисловості:

- контроль температури продукту;
- перевірка герметичності та ізоляції ємностей для зберігання різних рідин і газів.

5. Тепловізор в авіакосмічній і військовій техніці:

- системи самонаведення на ціль, системи оповіщення про ранній запуск ракет;
- тепла розвідка (виявлення живої сили і техніки);
- авіакосмічна зйомка тепловізором. Спостереження за елементами земного ландшафту, підземними теплотрасами, льодовиками, ділянками геотермальної діяльності, лісами і водними просторами, фауною тощо.

6. Тепловізори в медицині:

- моніторинг запальних процесів, локальних пухлин, порушення кровообігу, процесів загоєння ран, травм тощо.

8 ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

8.1 Загальні положення та класифікація приладів

Тиском P називають відношення сили F , що діє перпендикулярно до поверхні, до площі S цієї поверхні:

$$P = \frac{F}{S}. \quad (8.1)$$

Тиск – одна з основних величин, що визначає термодинамічний стан речовин. Тиск багато в чому визначає хід технологічного процесу, стан технологічних апаратів і режими їх функціонування. Із завданням вимірювання тиску доводиться стикатися під час вимірювань певних технологічних параметрів, наприклад витрати газу або пари, під час термодинамічних параметрів, що змінюються, рівня рідини тощо.

Розрізняють такі основні види тиску: атмосферний, абсолютний, надлишковий і вакуум (розрідження).

У Міжнародній системі одиниць (SI) за одиницю тиску взято Паскаль (Па) – тиск, створюваний силою в 1 Ньютон (Н), рівномірно розподіленої по поверхні площею 1 м^2 і спрямованої нормально до неї.

Несистемна одиниця тиску (1 кгс/см^2) дорівнює тиску на площу 1 см^2 сили в 1 кгс, де 1 кгс – сила, що надає масі в 1 кг нормального прискорення вільного падіння в $9,81 \text{ м/с}^2$. Одиниця тиску системи МКГСС (метр, кілограм-сила, секунда) дорівнює 1 кгс/м^2 .

У рідинних приладах із водним або ртутним заповненням скляних трубок тиск вимірюють у міліметрах водного або ртутного стовпчика (мм вод. ст. або мм рт. ст.). Незавжди встановити, що тиск в 1 мм вод. ст. дорівнює тиску в 1 кгс/м^2 .

Несистемна одиниця тиску – бар дорівнює тиску $1 \cdot 10^5 \text{ Па}$, або $1,01972 \text{ кгс/см}^2$. Ця одиниця зручна тим, що числа, що виражають тиск у барах і кгс/см^2 , відрізняються між собою не більше ніж на 2 %.

Через те, що зазначені одиниці – кгс/см², мм вод. ст., мм рт. ст. і бар – у цей час набули поширення, їх тимчасово допускають до застосування поряд з одиницями SI.

Співвідношення між різними одиницями тиску наведені в табл. 8.1.

Таблиця 8.1 – Співвідношення між одиницями тиску

Одиниця тиску	Па	бар	кгс/см ²	фіз. атм.	мм рт. ст.	мм вод. ст.
Па	1	1×10^{-5}	$1,02 \times 10^{-5}$	$9,87 \times 10^{-6}$	$7,5 \times 10^{-3}$	0,1
бар	1×10^5	1	1,02	0,99	750	$1,02 \times 10^4$
кгс/см ²	$9,8 \times 10^4$	0,98	1	0,97	735,6	1×10^4
фіз. атм.	1×10^5	1,01	1,03	1	760	$1,03 \times 10^4$
мм рт. ст.	133,3	$1,33 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	1	13,6
мм вод. ст.	9,8	$9,8 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$9,7 \times 10^{-5}$	$7,36 \times 10^{-2}$	1

Засоби вимірювання тиску класифікують за видом вимірювального тиску і принципом дії. За *видом вимірювального тиску* засоби вимірювання поділяють на такі:

- манометри надлишкового тиску – для вимірювання надлишкового тиску;
- манометри абсолютного тиску – для вимірювання тиску, відліченого від абсолютного нуля;
- барометри – для вимірювання атмосферного тиску. Барометри поділяють на ртутні й мембранні;
- вакуумметри – для вимірювання вакууму (розрідження);
- мановакуумметри – для вимірювання надлишкового тиску і вакууму (розрідження);
- напороміри – манометри малих надлишкових тисків (до 40 кПа);
- тягоміри – вакуумметри з верхньою межею вимірювання не більшою ніж 40 кПа;
- тягонапороміри-мановакуумметри з діапазоном вимірювання від +20 кПа до –20 кПа;
- вакуумметри залишкового тиску – вакуумметри, призначені для вимірювання глибокого вакууму або залишкового тиску, тобто абсолютних тисків менших ніж 200 Па;

– диференційні манометри – прилади вимірювання різниці тисків.

За *принципом дії* промислові прилади для вимірювання тиску поділяють на такі основні групи:

1) рідинні, засновані на зрівноважуванні вимірювального тиску гідростатичним тиском стовпця рідини;

2) пружинні, що вимірюють тиск за величиною деформації пружного елемента.

8.2 Рідинні засоби вимірювання тиску

Для рідинних манометрів величиною, що характеризує вимірювальний тиск, є видима висота стовпця (рівня) рідини, який урівноважують, у скляній вимірювальній трубці. До приладів цього виду належать однотрубні (чашкові) та двотрубні (U-подібні) манометри.

До рідинних засобів вимірювання тиску (різниці тисків і розрідження) з гідростатичним зрівноважуванням, які застосовують у технологічних процесах, належать поплавкові й дзвонові дифманометри.

Рідинні манометри є досить простими і точними приладами, які використовують для визначення невеликих надлишкових тисків, що не перевищують 0,2 МПа. Їх широко застосовують під час дослідницьких і налагоджувальних робіт. У цих манометрах як врівноважувальну рідину використовують ртуть, дистильовану воду або етиловий спирт.

У наш час номенклатура рідинних засобів вимірювання тиску з гідростатичним зрівноважуванням істотно обмежена. Здебільшого вони замінені більш удосконаленими деформаційними засобами вимірювання.

8.2.1 Двотрубні манометри

Найчастіше застосовують двотрубний манометр (рис. 8.1), що складається зі скляних вимірювальних трубок 1 і 2, з'єднаних унизу і закріплених на вертикальній підставці 3. Між трубками знаходиться міліметрова шкала 4 з нульовою поділкою посередині.

Вимірювальні трубки заповнюють урівноважувальною рідиною до нульової позначки шкали. Трубка 1 з'єднана гумовою трубкою 5 з вимірювальним середовищем, яке перебуває під абсолютним тиском, а трубка 2 – з атмосферою.

Під час під'єднання манометра вимірювальний тиск урівноважують стовпцем рідини висотою h , який відлічують за шкалою приладу. Внаслідок того, що рівень рідини в трубці 1 знизиться, а в трубці 2 відповідно зросте, то загальна висота стовпця h буде дорівнювати сумі поділок, позначених на шкалі вище і нижче нульової поділки.

Якщо урівноважувальною рідиною є вода або спирт, то відлік показань здійснюють за нижньою межею меніска, а якщо ртуть – то за верхньою. Тоді тиск визначають так:

$$P = \rho \cdot g \cdot h, \quad (8.2)$$

де ρ – густина рідини (для води $\rho \approx 1\,000\text{ кг/м}^3$);
 g – прискорення вільного падіння ($g = 9,81\text{ м/с}^2$).

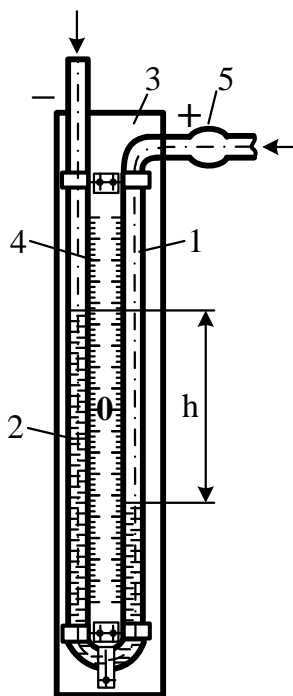


Рисунок 8.1 –
Двотрубний манометр

Потрібно відзначити, що висота трубок манометра, обмежена міцністю і зручністю відліку, і не повинна перевищувати 1,5 м. Тому під час вимірювання надлишкових тисків 0,015–0,2 МПа необхідно застосовувати врівноважувальну рідину з великою густиною ρ (ртуть), а за більш низьких тисків – з малою ρ (вода, спирт тощо).

Випускають двотрубні манометри з діапазоном вимірювань 100, 160, 250, 400, 600 і 1000 мм стовпчика рідини.

Під час вимірювання тиску двотрубним манометром становить незручність відлік рівнів рідини одночасно в обох вимірювальних трубках. Під час значних коливань вимірювального тиску точне визначення показань приладу є складним.

8.2.2 Однотрубні манометри

На рисунку 8.2 показана схема однотрубного манометра, що відрізняється від двотрубного тим, що замість другої вимірювальної трубки має широку посудину (чашку) 1. До нижньої частини посудини приєднана скляна вимірювальна трубка 2, поруч із якою закріплена міліметрова шкала 3. Прилад змонтований на вертикальній підставці 4. Посудина манометра контактує з вимірювальним середовищем за допомогою трубки 5. Вільний кінець вимірювальної трубки з'єднаний з атмосферою. Посудину і вимірювальну трубку заповнюють урівноважувальною рідиною до нульової поділки шкали. Здебільшого зниженням рівня рідини в посудині, тобто h_1 (див. рис. 8.2), можна знехтувати і вважати $h \approx h_1$. Тоді

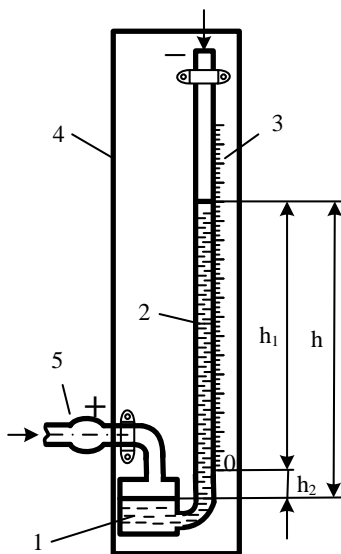


Рисунок 8.2 –
Однотрубний манометр

$$P = h_1 \cdot \rho \cdot g . \quad (8.3)$$

Похибка вимірювання однотрубним манометром вища, ніж двотрубним, проте більш зручним для першого є вимірювання рівня рідини в одній трубці.

8.2.3 Поплавкові манометри

Вони являють собою U-подібні рідинні манометри, в яких одне з колін розширено, і в ньому поміщений поплавков. Поплавок пов'язаний зі стрілкою, що рухається по шкалі. Поплавкові прилади найчастіше використовують як диференціальні, тобто для вимірювання перепаду тиску між двома точками.

На рисунку 8.3 наведена схема поплавкового диференціального манометра (дифманометра). Принцип дії такого дифманометра заснований на зрівноважуванні вимірювального перепаду тиску гідростатичним тиском, створюваним стовпцем рідини, що заповнює дифманометр. Під час під'єднання приладу до об'єкта вимірювання більший тиск подають у посудину більшого діаметра. Подачу тиску здійснюють через вентилі.

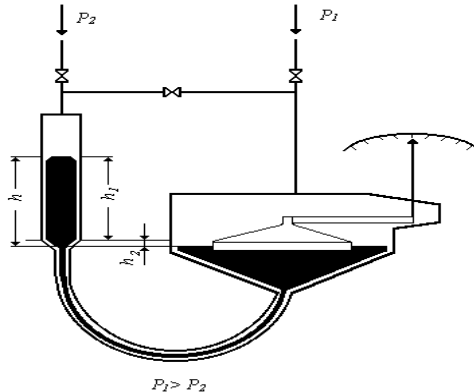


Рисунок 8.3 – Схема поплавкового диференціального манометра

У процесі вимірювання рівень рідини в широкій посудині змінюється, переміщаючи поплавков, який через механічну передачу переміщує показчик лічильного пристрою. Переміщення поплавка відбуватиметься доти, поки вимірювальну різницю тисків $p_1 - p_2$ не врівноважить вага стовпця рідини висотою $h = h_1 + h_2$.

Поплавкові дифманометри-витратоміри мають різні межі вимірювання перепаду тиску від 6,3 кПа до 0,10 МПа. Прилади з різними межами вимірювання відрізняються лише за внутрішнім діаметром мінусової посудини та її висотою.

Клас точності поплавкових дифманометрів становить 1,0 і 1,5. Для передавання на відстань інформації про значення вимірювального перепаду тиску дифманометри, що розглядаються, оснащують перетворювачами переміщення показчика в уніфікований сигнал вимірювальної інформації.

Висока точність вимірювань і можливість реєстрації показань без застосування спеціальних джерел енергії є перевагами дифманометрів цього типу. Основним їх недоліком є наявність токсичної рідини – ртуті, яка за різких перепадів тиску може вилитися з приладу. Для унеможливлення викиду рідини під час під'єднання приладу до об'єкта відкривають вентиль, який з'єднує судини дифманометра, а після стабілізації тиску в обох судинах вентиль закривають.

8.2.4 Кільцеві прилади

Кільцевими приладами можна вимірювати малий тиск, розрідження і різниці тиску.

На рисунку 8.4. наведена схема кільцевого дифманометра. Він складається з порожнистого замкненого кільця 1, розділеного вгорі перегородкою 2. Кільце підвішене за допомогою ножової опори 3 в геометричному центрі O . По обидва боки перегородки 2 в кільце входять трубки 4 та 5, які використовують для з'єднання порожнин кільця з вимірювальним тиском або розрідженням. До нижньої частини кільця прикріплений вантаж 6. Порожнина кільця до половини заповнена рідиною (водою, маслом, ртуттю).

Під час з'єднання обох порожнин кільця з просторами, в яких є тиск p і p_1 (причому $p > p_1$), різниця рівнів h буде пропорційна різниці тисків $p - p_1$. Ця різниця тисків $p - p_1$, що діє на перегородку 2, створює обертовий момент, під дією якого кільце повертається навколо точки опори за годинниковою стрілкою. Поворот кільця створює протидіючий момент. Під час врівноваження обох моментів кільце зупиниться в новому положенні рівноваги.

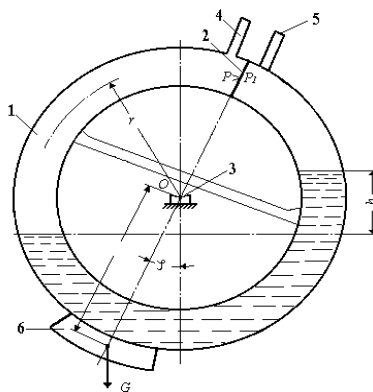


Рисунок 8.4 – Схема кільцевого приладу:

1 – кільце; 2 – перегородка; 3 – опора;
4 і 5 – підвідні (з'єднувальні) трубки; 6 – вантаж

Найбільшу можливу величину верхньої межі вимірювання різниці тисків визначають в основному розмірами кільця і щільністю затвора рідини і зазвичай становить 250 мм рт. ст. для приладів із ртутним заповненням та 250 мм вод. ст. для приладів із водним або масляним заповненням. Зміну меж вимірювання здійснюють зміною врівноважувального вантажу.

Прилади з водним і масляним заповненням призначені для роботи за надмірного тиску до $0,5 \text{ кгс/см}^2$; прилади з ртутним заповненням – $10\text{--}100 \text{ кгс/см}^2$.

Основна допустима похибка кільцевих приладів не перевищує $1,1\text{--}1,5\%$ від верхньої межі вимірювання.

Перевагою кільцевих приладів перед поплавковими є відсутність ущільнювальних пристроїв в передавальному механізмі, що особливо важливо для приладів, розрахованих на високий тиск. Їх недоліком є те, що тиск подають через трубки, які можуть вносити похибку в вимірювання.

Передавання показань на відстань можна здійснювати за допомогою перетворювача феродинамічної системи.

8.2.5 Дзвонові прилади

Їх використовують для вимірювання малих тисків і розрідження (тягоміри і напороміри) та як диференціальні манометри.

Принципова схема дзвонового приладу наведена на рисунку 8.5. Прилад складається з посудини 1, що містить рідину, в яку занурений дзвін 2. Під дзвін уведена трубка 3, яку використовують для подачі під дзвін тиску або розрідження. Під час подачі під дзвін тиску він піднімається, оскільки на нього діє додаткове зусилля, направлене вгору.

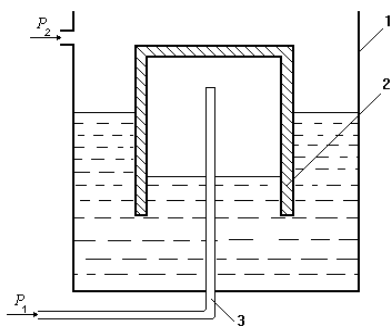


Рисунок 8.5 – Схема дзвонового приладу:

1 – посудина; 2 – дзвін; 3 – трубка

Щоб перетворити цю систему в вимірювальний прилад, необхідно забезпечити однозначність величини переміщення дзвону і зміни тиску. Для цього в систему повинно бути введене змінне протидіюче зусилля, функціонально залежне від переміщення дзвону. В існуючих дзвонових приладах використовують для створення протидіючого зусилля

архімедову силу, вантаж або пружину. Найбільш простий випадок – використання дзвону з товстими стінками (урівноваження архімедовою силою). Водночас дзвін буде підніматися доти, поки зусилля, що діє на дзвін, не врівноважить змінна виштовхувальна сила.

На рисунку 8.6 показана принципова схема дзвонового приладу з урівноважувальним вантажем. У цьому разі дзвін підвішують до коромисла, до якого кріплять вантаж G . Під час зміни тиску або розрідження дзвін опуститься на деяку величину H . Водночас коромисло і шток вантажу G повернуться на деякий кут φ .

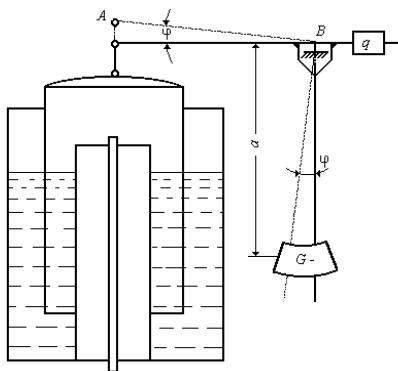


Рисунок 8.6 – Схема дзвонового приладу з урівноважувальним вантажем

Чутливим елементом дифманометра, показаного на рисунку 8.7, є тонкостінний дзвін 1, частково занурений у рідину і підвішений на пружині 2. Оскільки густина матеріалу, з якого виготовлений дзвін зазвичай більша за густину робочої рідини, то в початковому положенні (при $p_1 = p_2 = 0$) пружина буде дещо розтягнута, врівноважуючи різницю між силою тяжіння дзвону і гідростатичним тиском рідини на його стінці. Під час наростання перепаду тиску починається підйом дзвона, що викликає спочатку ліквідацію розтягнутого положення пружини, а потім перехід її в стислий стан.

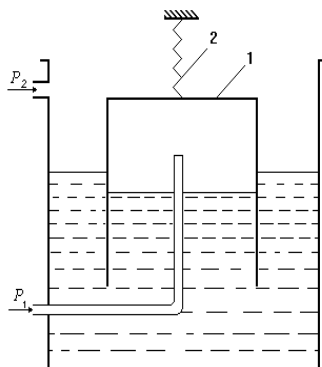


Рисунок 8.7 – Схема дзвонового дифманометра з пружинною протидією: 1 – дзвін; 2 – пружина

Абсолютна похибка вимірювання тиску дзвонowymi приладами зазвичай становить $\pm(0,5-1)$ мм, що залежить від правильності відліку висоти стовпця рідини неозброєним оком. Використання оптичних пристосувань (візуалізаторів) помітно зменшує цю похибку.

8.3 Деформаційні прилади для вимірювання тиску

Висока точність, простота конструкції, надійність і низька вартість є основними факторами, що обумовлюють значне поширення деформаційних приладів для вимірювання тиску в промисловості й наукових дослідженнях.

Принцип дії пружинних приладів заснований на врівноважуванні вимірювальної величини зусиллями деформації різного виду пружних елементів. Величину деформації пружного елемента за допомогою різних пристроїв перетворюють у кутове або лінійне переміщення покажчика по шкалі приладу.

Пружинні прилади можна поділити на такі групи:

- прилади з трубчастою пружиною (рис. 8.8 а і б). Прилади цього типу часто називають пружинними на відміну від мембранних і сильфонних приладів;

– мембранні прилади, в яких перетворення тиску в переміщення здійснює пружинна мембрана (рис. 8.8 в), анероїдна або мембранна коробка (рис. 8.8 г, д), блок анероїдних або мембранних коробок (рис. 8.8 е, є).

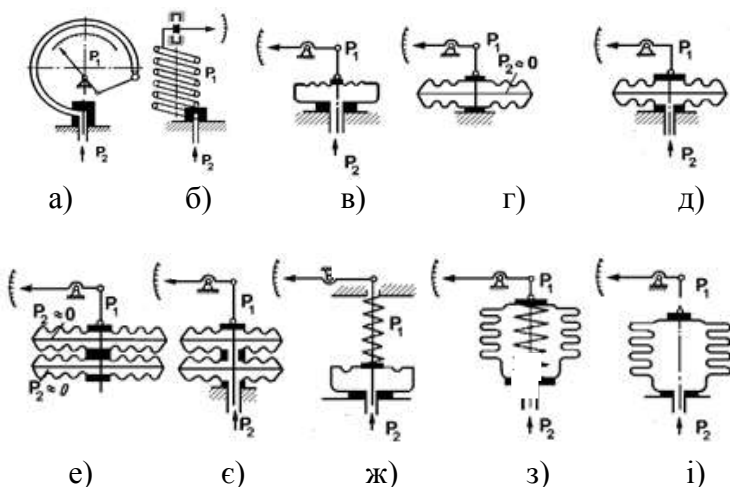


Рисунок 8.8 – Види пружинних приладів

– прилади, в яких вимірювальний тиск попередньо перетворюють у зусилля, що діє на пружину. До цієї групи приладів належать такі:

- а) пружинно-мембранні з гнучкою мембраною (рис. 8.8 ж);
- б) пружинно-сильфонні (рис. 8.8 з);

– прилади, в яких згадане перетворення здійснює гармонікова мембрана (сильфон) (рис. 8.8 і).

8.3.1 Прилади з трубчастими пружинами

Найбільше застосування мають прилади з одновитковою трубчастою пружиною. Такі пружини застосовують у манометрах, вакуумметрах, мановакуумметрах і дифманометрах. Прилади цього типу випускають лише показувальними у звичайному, вібростійкому, антикорозійному, вогне- і вибухозахищеному виконаннях.

Основна деталь приладу з одновитковою трубчастою пружиною – зігнута по дузі кола трубка 1 еліптичного або

плоскоовального перетину (рис. 8.9). Таку трубку називають трубкою Бурдона. Одним кінцем трубка Бурдона закладена в тримач 2, що закінчується ніпелем із різьбленням для приєднання до джерела тиску. Усередині тримача проходить канал, що з'єднаний з внутрішньою порожниною трубки 1.

Принцип дії приладів з трубчастою пружиною заснований на властивості трубчастої криволінійної пружини з *некруглим* поперечним перерізом змінювати свою кривизну під час зміни надлишкового тиску або розрідження всередині трубки. Якщо в трубку подати надлишковий тиск, то кривизна трубки зменшиться і вона випрямиться; під час створення розрідження всередині трубки кривизна її зростає і вона скручується.

Переміщення вільного кінця трубки за допомогою передавального механізму перетворюється в обертання стрілки приладу, що показує, або у вхідне переміщення електричного або пневматичного вторинного перетворювача.

Крім С-подібної трубки Бурдона існує *спіральна* трубка Бурдона, принцип роботи якої збігається з принципом дії

С-подібної трубки, за винятком того, що трубка в цьому разі має форму спіралі (рис. 8.10).

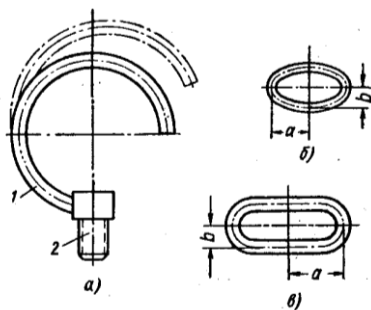


Рисунок 8.9 – Прилади з одновитковою трубчастою пружиною:

- а) схема трубчастої пружини: 1 – трубка; 2 – тримач;
- б) еліптичний поперечний переріз трубки;
- в) плоскоовальний поперечний перетин трубки

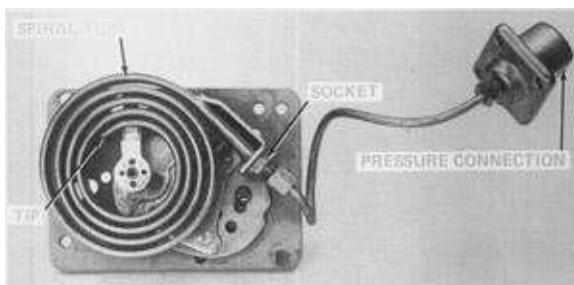


Рисунок 8.10 – Спіральна трубка Бурдона

Таке намотування робить можливим розпрямлення трубки більшою мірою, ніж С-подібної. Таке збільшення з використанням спіральної трубки вважають перевагою, оскільки для деяких вимірювальних приладів потрібно більший зсув, ніж у С-подібної трубки Бурдона.

Також існує *гвинтова* трубка Бурдона (рис. 8.11), конструкція якої дуже схожа з конструкцією С-подібної і спіральної трубок. Одна основна відмінність полягає в такому: в гвинтовій трубці витки намотані гвинтоподібно впритул один до одного. Це робить конструкцію трубки значно більш компактною порівняно з іншими, вона може використовуватися в обмеженому просторі. Так само, як і спіральна, гвинтова трубка має більший зсув наконечника порівняно з С-подібною трубкою.

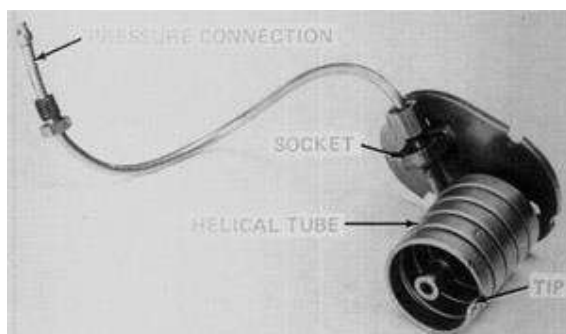


Рисунок 8.11 – Гвинтова трубка Бурдона

Вакуумметр із одновитковою трубчастою пружиною конструктивно ідентичний розглянутому манометру. Відмінність полягає лише у шкалі та напрямку переміщення стрілки. У вакуумметрах переміщення стрілки може відбуватися як за годинниковою стрілкою, так і проти неї. Відмінною рисою мановакуумметра є шкала з нулем у середній частині. Шкала, що розміщена ліворуч від нуля, вимірює вакуум, а шкала, що розміщена праворуч, – надлишковий тиск.

Діапазони вимірювання таких манометрів знаходиться в межах від 0–0,1 МПа до 0–103 МПа; вакуумметрів – від –0,1 МПа до 0 МПа. Класи точності приладів: 0,4(0,5); 0,6; 1,0; 1,5(1,6); 2,5; 4,0.

Поряд із розглянутими приладами з трубчастою пружиною, на практиці використовують манометри і вакуумметри, що мають електроконтактні пристрої, що сигналізують. Ці засоби вимірювання тиску мають назву *електроконтактних*. Клас точності електроконтактних манометрів і вакуумметрів 1,5. Похибка спрацьованості сигналізувального пристрою $\pm 2,5\%$.

8.3.2 Мембранні прилади

Прилади з чутливим елементом у вигляді гофрованих мембран, мембранних коробок і мембранних блоків застосовують для вимірювання невеликих надлишкових тисків та розріджень (манометри, напороміри і тягоміри), та перепадів тиску (дифманометри-витратоміри).

Принцип дії приладів полягає в перетворенні вимірювального тиску або розрідження в переміщення твердого центра мембранного чутливого елемента, що за допомогою передавального трубко-секторного механізму перетворюють в обертовий рух показчика.

Залежність прогину мембрани від тиску в загальному випадку нелінійна. Величина прогину мембрани є складною функцією діючого на неї тиску, її геометричних параметрів (діаметра, товщини, кількості, форми і розмірів гофрів), а також модуля пружності матеріалу мембрани.

Гофрування мембрани не лише збільшує її жорсткість, тобто зменшує прогин за однакового тиску, а й одночасно перетворює характеристику мембрани з нелінійної в лінійну.

Через малі зусилля, що розвиває деформаційний чутливий елемент, мембранні прилади випускають в основному показувальними.

З метою збільшення прогину в приладах для малих тисків (розріджень) мембрани попарно з'єднують (зварюванням або спайкою) в мембранні коробки, а коробки – в мембранні блоки. Мембранні коробки можуть бути анероїдними (рис. 8.8 г) і манометричними (рис. 8.8 д). Анероїдні коробки, що застосовують у барометрах і барографах, герметизовані і заповнені повітрям або будь-яким газом за дуже низького тиску, зазвичай близько 0,01 мм рт. ст. Деформація анероїдної коробки відбувається під дією різниці тисків довкільля та в порожнині коробки.

Оскільки тиск у порожнині коробки дуже малий, то можна вважати, що її деформацію визначає атмосферний тиск. Величина деформації анероїдної або манометричної коробки дорівнює сумі деформацій складових її мембран.

Манометричні мембранні коробки застосовують у тягомірах і напоромірах для вимірювання невеликих тисків і розріджень. Максимальний діапазон вимірювання мембранних манометрів 0–2,5 МПа, вакуумметрів – від –0,1 МПа до 0 МПа. Класи точності приладів 1,5 і 2,5.

8.3.3 Пружинно-мембранні прилади

Такі манометри відрізняються від описаних вище тим, що в них мембрана, яка сприймає тиск, виготовлена з гнучкого матеріалу (м'ява мембрана) і тиск урівноважується внаслідок пружності циліндричної гвинтової пружини (див. рис. 8.8 ж). Гнучкі мембрани зазвичай виготовляють із гуми з тканинною основою, з тканиною з газонепроникним просоченням або з гнучких пластмас. М'яві мембрани застосовують у тягомірах, напоромірах, тягонапоромірах і дифманометрах.

Недоліками мембранних приладів є невеликий хід рухомого центру чутливого елемента, значні відхилення

жорсткості мембран від розрахункової і труднощі регулювання жорсткості мембран. Ці недоліки мембранних чутливих елементів усунені в приладах, побудованих за схемою силової електричної або пневматичної компенсації.

8.3.4 Сильфонні прилади

Прилади цього типу призначені для вимірювання надлишкового тиску, розрідження та різниці тисків. Їх виконують показувальними та самописними приладами. Чутливим елементом сильфонних приладів є циліндрична тонкостінна посуда з кільцевими складками (гофрами), яку називають сильфоном (див. рис. 8.8 і). Під впливом осьового навантаження (зовнішнього або внутрішнього тиску) довжину сильфона змінюють, збільшуючи або зменшуючи залежно від напрямку прикладеної сили. У межах робочого діапазону тисків деформація сильфона приблизно пропорційна діючому зусиллю, тобто характеристика сильфона близька до лінійної.

Істотні недоліки сильфонів – значний гістерезис і деяка нелінійність характеристики. Для збільшення жорсткості, зменшення впливу гістерезису і нелінійності часто всередині

сильфона розміщують гвинтову циліндричну пружину (рис. 8.8 з). Жорсткість пружини зазвичай у кілька разів перевищує жорсткість сильфона, завдяки чому різко зменшується вплив гістерезису сильфона і нелінійності його характеристики.

Відносно велика величина робочого ходу сильфона дозволяє застосовувати їх у реєструвальних приладах.

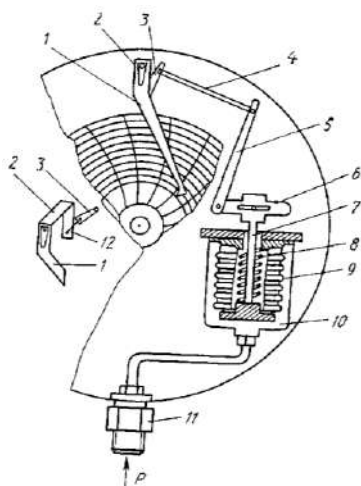


Рисунок 8.12 – Схема самописного сильфонного манометра

Схема самописного сильфонного манометра наведена на рисунку 8.12. Вимірювальний тиск через штуцер 11 подають у камеру 10, в якій розміщений деформаційний чутливий елемент – сильфон 9. Для збільшення твердості сильфона всередині нього розміщена гвинтова пружина 8. Під дією тиску сильфон деформується, і дно його піднімає шток 7, жорстко з'єднаний із двоплечим важелем 6, останній через систему важелів 5, 4, 3 повертає вісь 12 й укріплений на ній П-подібний важіль 2. До П-подібного важеля прикріплена стрілка 1 з пером. Запис вимірювального тиску виконують на дисковій діаграмі, привод якої здійснюють за допомогою синхронного двигуна або годинникового механізму. Верхня межа вимірювання сильфонних приладів обмежена тисками 0,025–0,4 МПа. Класи точності сильфонних манометрів надлишкового тиску, вакуумметрів і мановакуумметрів становлять 1,5; 2,5.

Для вимірювання різниці тисків і витрати рідких і газоподібних середовищ широкого застосування набули *сильфонні дифманометри*. Класи точності сильфонних показувальних і самописних дифманометрів становить 1,0 і 1,5.

8.3.5 Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску прямого перетворення

Вимірювальні перетворювачі тиску, засновані на методі прямого перетворення, розрізняють як за видом деформаційного чутливого елемента, так і за способом перетворення його переміщення або зусилля у сигнал вимірювальної інформації. Для перетворення переміщення чутливого елемента в сигнали вимірювальної інформації широко застосовують індуктивні, диференціально-трансформаторні, ємнісні, тензорезисторні й інші перетворювальні елементи. Перетворення зусилля у сигнали вимірювальної інформації здійснюють п'єзоелектричними перетворювальними елементами.

Індуктивні вимірювальні перетворювачі тиску. На рисунку 8.13 а показана схема вимірювального перетворювача тиску з перетворювальним елементом індуктивного типу. Мембрана 1, що сприймає тиск, є рухомим якорем електромагніту 2 з обмоткою 3. Під дією вимірювального тиску

мембрана 1 переміщується, що викликає зміну електричного опору індуктивного перетворювального елемента.

Диференціально-трансформаторні вимірювальні перетворювачі тиску. Вимірювальний перетворювач тиску диференціально-трансформаторного (ДТ) типу (рис. 8.13 б) містить деформаційний чутливий елемент 1 і ДТ-елемент 2. Перетворювальний елемент являє собою каркас із діелектрика, на якому розміщені котушка з первинною обмоткою 7, та дві секції 4 і 5 вторинних обмоток, увімкнених зустрічно. Усередині каналу котушки розміщене рухоме осердя 6 з магнітом'якого матеріалу, пов'язане із пружиною 1 тягою 3.

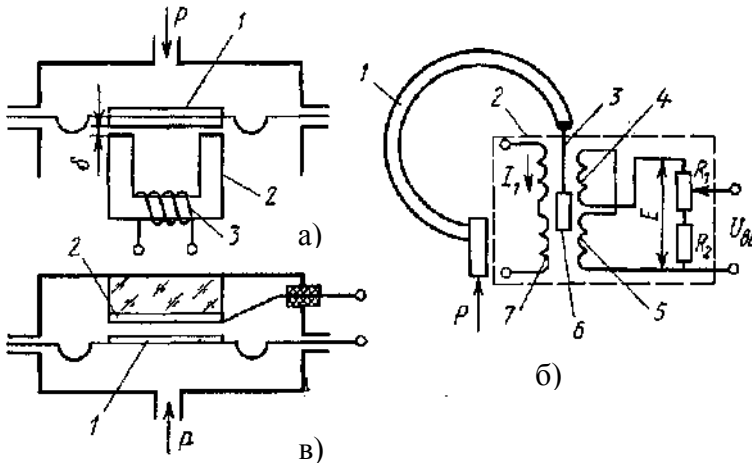


Рисунок 8.13 – Схеми вимірювальних перетворювачів тиску:

- а) індуктивні перетворювачі;
- б) диференціально-трансформаторні перетворювачі;
- в) ємнісні перетворювачі

Завдяки зміни регульованого опору R_1 можна змінювати межі вимірювання на $\pm 25\%$. Формування вихідного сигналу ДТ-елемента здійснюють у такий спосіб. Під час проходження по первинних обмотках струму виникають магнітні потоки, що пронизують обидві секції вторинної обмотки та індукують у них ЕРС. Значення цього ЕРС пов'язані із взаємними

індуктивностями між первинною обмоткою і кожною із секцій вторинної обмотки.

Перетворення вимірювального тиску в електричні сигнали розглянутим перетворювачем тиску здійснюють за рахунок перетворення тиску в деформацію (переміщення) чутливого елемента 1, жорстко з'єданого із осердям 6, і подальшого перетворення переміщення осердя 6 в електричний сигнал ДТ-елементом. Детально роботу дифтрансформаторного перетворювача розглянуто в п. 4.2.2. Класи точності таких перетворювачів становлять 1,0 і 1,5.

Ємнісні вимірювальні перетворювачі тиску. Схема вимірювального перетворювача тиску з ємнісним перетворювальним елементом наведена на рисунку 8.13 в. Вимірювальний тиск сприймає металева мембрана 1, що є рухомим електродом ємнісного перетворювального елемента. Нерухомий електрод 2 ізолюють від корпусу за допомогою кварцових ізоляторів. За залежністю ємності C перетворювального елемента від переміщення δ мембрани 1 вимірюють величину тиску.

Тензорезисторні вимірювальні перетворювачі тиску. Перетворювачі тиску цих видів являють собою деформаційний чутливий елемент, найчастіше мембрану, на яку наклеюють тензорезистори. В основу принципу роботи тензорезисторів покладено явище тензоефекту, суть якого полягає в зміні опору ΔR провідників і напівпровідників під час їх деформації ε . Це явище можна пояснити за допомогою такої формули:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (8.4)$$

де R – опір провідника;
 ρ – питомий опір провідника;
 l – довжина провідника;
 S – поперечний переріз провідника.

Під час деформації $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ провідника відбувається зміна його опору на величину $\frac{\Delta R}{R}$.

Набули поширення дровоті й фольгові тензорезистори, що виготовляють із провідників типу манганіну, ніхрому, константану, а також напівпровідникові тензорезистори, що виготовляють із кремнію і германію *p*- та *n*-типів. Опір тензорезисторів, що виготовляють із провідників, становить 30–500 Ом, а опір напівпровідникових тензорезисторів знаходиться в межах від 50 Ом до 10 кОм.

П'єзоелектричні вимірювальні перетворювачі тиску. В основу роботи цих перетворювачів покладене перетворення вимірювального тиску в зусилля за допомогою деформаційного чутливого елемента і подальшого перетворення цього зусилля в сигнал вимірювальної інформації п'єзоелектричним перетворювальним елементом. Принцип дії п'єзоелектричного перетворювального елемента базується на п'єзоелектричному ефекті, який спостерігають у низці кристалів, таких, як кварц, турисин, титанат барію тощо. Суть п'єзоелектричного ефекту полягає в тому, що якщо кварцові пластини піддати стисканню силою N , то на її поверхні виникнуть заряди різних знаків. Значення заряду Q пов'язане із силою N таким співвідношенням:

$$Q = k \cdot N, \quad (8.5)$$

де k – п'єзоелектрична стала, що не залежить від розміру пластини і визначається природою кристала.

Подальше перетворення пояснено в п. 4.1.2.

На рисунку 8.14 показана схема п'єзоелектричного вимірювального перетворювача тиску. Мембрана 4 перетворює вимірювальний тиск у зусилля, що викликає стискання стовпчиків кварцових пластин 2 діаметром 5 мм і товщиною 1 мм. У результаті п'єзоефекту виникає електричний заряд Q , який через виводи 1 подають на електронний підсилювач 5, що має

великий вхідний опір. Значення заряду пов'язане з вимірювальним тиском P такою залежністю:

$$Q = k \cdot P \cdot F, \quad (8.6)$$

де F – ефективна площа мембрани.

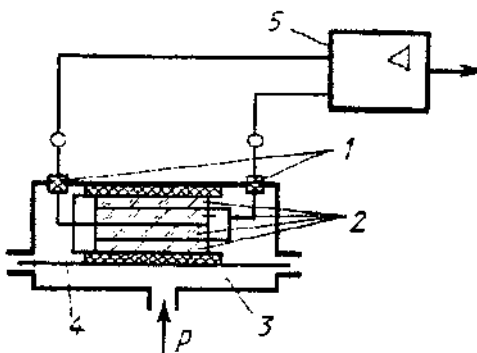


Рисунок 8.14 – Схема п'єзоелектричного вимірювального перетворювача тиску

Внаслідок того, що частота власних коливань системи «мембрана – кварцові пластини» становить десятки кілогерців, то вимірювальні перетворювачі цього типу мають високі динамічні характеристики, що обумовило їх широке застосування під час контролю тиску в системах з процесами, що мають швидкий перебіг.

Чутливість п'єзоелектричних вимірювальних перетворювачів тиску може бути підвищена за рахунок застосування декількох, паралельно з'єднаних кварцових пластин, і збільшення ефективної площі мембрани.

Верхні межі вимірювання п'єзоелектричних перетворювачів тиску із кварцовими чутливими елементами досягають 100 МПа. Класи точності відповідають значенням 1,5 та 2,0.

9. ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИН

9.1 Загальні відомості та класифікація рівнемірів

Для ведення технологічних процесів велике значення має контроль за рівнем рідин і твердих сипучих матеріалів у виробничих апаратах.

Рівнем називають висоту заповнення технологічного апарата робочим середовищем – рідиною або сипучим тілом. Рівень робочого середовища є технологічним параметром, інформація про нього необхідна для контролю за становищем рівня у виробничому апараті під час здійснення технологічного процесу або для визначення кількості рідини в ємності. Знаючи площу будь-якої ємності, за величиною рівня можна визначити кількість речовини в ній. Тому вимірювання рівня також дає можливість одержувати інформацію про масу рідини в резервуарах. Рівень вимірюють в одиницях довжини. Засоби вимірювання рівня називають *рівнемірами*.

За *призначенням* рівнеміри поділяють на такі:

- для вимірювання рівня робочого середовища;
- для вимірювання маси рідини в технологічному апараті;
- для сигналізації граничних значень рівня робочого середовища.

За *характером роботи* рівнеміри можуть бути неперервної і переривчастої (релейної) дії. Релейні рівнеміри спрацьовують під час досягання певного рівня; їх використовують для сигналізації і тому називають сигналізаторами рівня.

За *діапазоном вимірювання* розрізняють рівнеміри широкого і вузького діапазонів. Рівнеміри широкого діапазону (з межами вимірювань 0,5–20 м) призначені для проведення товарно облікових операцій. Якщо за умовами технологічного процесу немає необхідності у вимірюванні рівня за всією висотою апарату, то у такому разі застосовують вузькодіапазонні, але більш точні рівнеміри. Рівнеміри вузького діапазону з межами вимірювань 0–100 мм або 0–450 мм зазвичай використовують у системах автоматичного регулювання.

Вимірювання рівня в багатьох галузях промисловості здійснюють різними за принципом дії рівнемірами, з яких для вимірювання рівня рідини застосовують поплавкові, буйкові, гідростатичні, ультразвукові та акустичні прилади, для вимірювання рівня рідини і твердих сипучих матеріалів – ємнісні і радіоізотопні.

9.2 Візуальні засоби вимірювання рівня

Із візуальних засобів вимірювання рівня на виробництві найчастіше застосовують скляні рівнеміри. Вимірювання рівня за допомогою скляних рівнемірів (рис. 9.1 а) ґрунтується на законі сполучених посудин. Вказівне скло 1 за допомогою арматур з'єднують із нижньою і верхньою частинами ємності. Спостерігаючи за положенням меніска рідини в трубці 1, роблять висновок про положення рівня рідини в ємності. Щоб уникнути додаткової похибки, обумовленої розходженням температури рідини в резервуарі й у скляній трубці, перед вимірюванням здійснюють промивання скляних рівнемірів. Для цього передбачений вентиль 2.

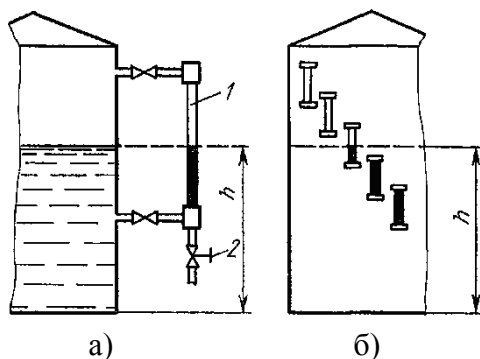


Рисунок 9.1 – Схеми візуальних рівнемірів

Для запобігання аварії під час випадкової поломки скла у арматурі скляних рівнемірів використовують запобіжні клапани, що забезпечують автоматичне перекривання каналів, які

зв'язують вказівне скло з технологічним апаратом. Через низьку механічну міцність скляні рівнеміри зазвичай виконують довжиною не більше ніж 0,5 м. Тому для вимірювання рівня в резервуарах більше ніж 0,5 м (рис. 9.1 б) встановлюють декілька скляних рівнемірів з тим розрахунком, щоб вони перекривали один одного. Абсолютна похибка вимірювання рівня скляними рівнемірами становить $\pm(1-2)$ мм. Під час вимірювання можливі додаткові похибки, пов'язані із впливом температури довкілля. Скляні рівнеміри застосовують під час тиску до 2,94 МПа і за температури до 300 °С.

9.3 Поплавкові засоби вимірювання рівня

Поплавкові рівнеміри належать до найбільш поширених автоматичних приладів для вимірювання рівня рідини поряд з гідростатичними, електричними і радіоізотопними.

У поплавковому рівнемірі чутливим елементом є поплавок, що плаває на поверхні рідини. Поплавок може переміщатися вгору або вниз одночасно з переміщенням вимірюваного рівня рідини. Внаслідок цього вимірюваний рівень перетворюють у переміщення поплавка. У рівнемірах поплавкового типу застосовують поплавок із легкого матеріалу, стійкого до агресивного середовища. Рівнеміри такого типу використовують для вимірювання рівня рідини у відкритих ємностях і резервуарах.

На рисунку 9.2 показаний найпростіший пристрій з поплавком постійного занурення. Поплавок 1 підвішений на гнучкому тросі, перекинутому через ролики 2. Із протилежного боку троса укріплений вантаж 3 для підтримки постійного натягу троса. На вантажі закріплена стрілка, що показує на шкалі рівень рідини. Таким простим пристроєм можна вимірювати рівень із достатньою для більшості випадків точністю.

Недоліками простого поплавкового рівнеміра є перевернена шкала (з нулем біля верхнього краю резервуару), труднощі відліку на початку шкали біля високого резервуару, похибка через зміни сили, що натягує трос (під час підйому рівня до сили тяжіння противаги додається сила тяжіння тросу).

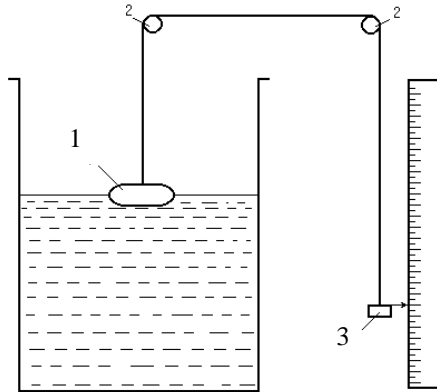


Рисунок 9.2 – Найпростіший поплавковий вимірювач рівня:
1 – поплавок; 2 – ролики; 3 – вантаж

У разі необхідності передачі інформації на відстань встановлюють систему дистанційної передачі інформації, що перетворює переміщення в електричний сигнал, який надходить на вторинний прилад.

Схема поплавкового рівнеміра з сельсинною дистанційною передачею (див. п. 4.2.1) інформації наведена на рисунку 9.3. Під час переміщення поплавок 1 барабан 3 із тросом, повертається і змушує повертатися ротор сельсина-датчика 4. З датчиком електрично пов'язаний сельсин-приймач, ротор якого повернеться на такий самий кут, як у сельсина-датчика 4.

Натяг троса забезпечує вантаж 2, підвішений на тросі. Сельсин-приймач (вторинний прилад) пов'язаний з рахунковим механізмом. Під час обертання ротора сельсина повертається барабани лічильного механізму, і у віконцях з'являються цифри, що показують положення рівня. У вторинному приладі є два контакти для сигналізації граничних положень рівня. Контакти можуть бути налаштовані на будь-які точки в межах шкали приладу. Діапазон вимірювання рівня становить 10 м.

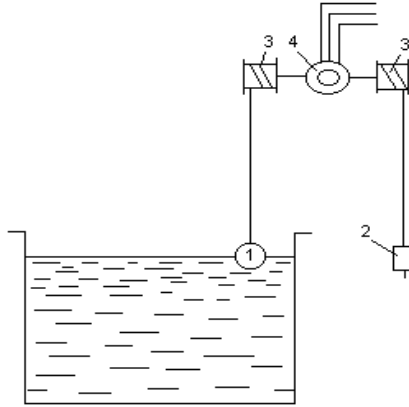


Рисунок 9.3 – Поплавковий рівнемір із сельсин-датчиком:
 1 – поплавок; 2 – вантаж; 3 – барабани;
 4 – сельсин-датчик

Під час вимірювання рівня агресивних рідин поплавці (циліндричний або кульовий) виготовляють із корозійностійкого матеріалу.

9.4 Буйкові засоби вимірювання рівня

Широкого застосування набули прилади з поплавком змінного занурення (буйковий рівнемір). Буйкові рівнеміри застосовують для вимірювання рівня в судинах під тиском або розрідженням. Чутливим елементом у цих рівнемірах є циліндричний буйок, виготовлений із матеріалу із густиною, більшою ніж густина рідини. Буйки не плавають на поверхні рідини і під час підвищення рівня вони занурюються в рідину. Принцип дії буйкових рівнемірів заснований на тому, що на занурений буйок діє з боку рідини виштовхувальна сила. Згідно із законом Архімеда ця сила дорівнює масі рідини, витисненої буйком. Кількість витисненої рідини залежить від глибини занурення буйка, тобто від рівня в ємності. Отже, в буйкових рівнемірах вимірюваний рівень перетворюють у пропорційну йому виштовхувальну силу. Тому залежність виштовхувальної сили від вимірюваного рівня є лінійною.

Перетворення ваги буйка в сигнал вимірювальної інформації здійснюють за допомогою уніфікованих перетворювачів «сила-тиск» і «сила-струм». Відповідно до виду використовуваного перетворювача сили розрізняють пневматичні та електричні буйкові рівнеміри.

Схема буйкового пневматичного рівнеміра наведена на рисунку 9.4. Рівнемір працює в такий спосіб. Коли рівень рідини в апараті дорівнює початковому h_0 (в окремому випадку h_0 може дорівнювати 0), вимірювальний важіль 2 перебуває в рівновазі, тому що момент M_1 , створюваний вагою буйка G , зрівноважують моментом M_2 , створюваним противагою N .

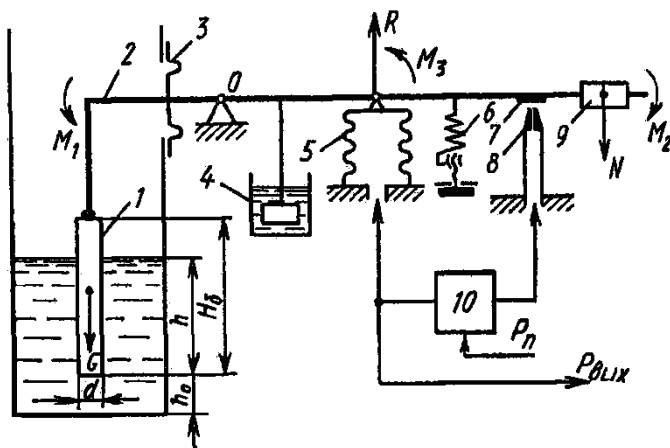


Рисунок 9.4 – Схема пневматичного буйкового рівнеміра:

- 1 – буйок; 2 – важіль; 3 – ущільнювальна мембрана;
- 4 – демпфер; 5 – сильфон від'ємного зворотного зв'язку;
- 6 – пружина; 7 – заслінка; 8 – сопло; 9 – вантаж;
- 10 – пневматичний підсилювач

Коли рівень рідини стає більшим ніж h_0 , частина буйка занурюється в рідину, водночас вага буйка зменшується, а отже, зменшується і момент M_1 , створюваний буйком на важелі 2.

Внаслідок того, що M_2 стає більшим ніж M_1 , важіль 2 рухається навколо точки O за годинниковою стрілкою і прикриває заслінкою 7 сопло 8. Тому тиск у лінії сопла збільшується. Цей тиск надходить у пневматичний підсилювач 10, вихідний сигнал якого є вихідним сигналом рівнеміра. Цей самий сигнал одночасно посиляють у сильфон від'ємного зворотного зв'язку 5. Під дією тиску $P_{вих}$ виникає сила R , момент M_3 якої збігається за напрямком з моментом M_1 , тобто дія сили R спрямована на відновлення рівноваги важеля 2. Рух вимірювальної системи перетворювача відбувається доти, поки сума моментів усіх сил, що діють на важіль 2, не стане такою, що дорівнює нулю.

Вихідний сигнал пневматичних буйкових рівнемірів змінюється в діапазоні 0,02–0,1 МПа під час зміни рівня рідини від нуля до максимального значення. Початкове значення вихідного сигналу (0,02 МПа) задають пружиною 6. Для запобігання автоколивань вимірювальної системи рівнеміра використовують демпфер 4. Герметизацію технологічного апарату під час установки в ньому чутливого елемента досягають ущільнювальною мембраною 3.

Принцип дії буйкових рівнемірів дозволяє в широких межах змінювати їх діапазон виміру. Це досягають як заміною буйка, так і зміною передавального відношення важільного механізму проміжного перетворювача.

Мінімальна верхня межа вимірювань пневматичних рівнемірів становить 0,02 м, максимальна – 16 м.

Крім розгляненої модифікації пневматичних рівнемірів, випускають рівнеміри з уніфікованим перетворювачем «сила-тиск».

Буйкові засоби вимірювання рівня застосовують під час температури робочого середовища від -40°C до $+400^{\circ}\text{C}$ і тиску робочого середовища до 16 МПа. Класи точності буйкових рівнемірів – 1,0 і 1,5.

9.5 Гідростатичні засоби вимірювання рівня

Вимірювання рівня гідростатичними рівнемірами зводять до вимірювання гідростатичного тиску P , Па, створюваного стовпцем H рідини постійної густини ρ , відповідно до рівності

$$P = \rho \cdot g \cdot H . \quad (7.2)$$

Існують гідростатичні рівнеміри з неперервним продуванням повітря або газу (п'єзометричні рівнеміри) і з безпосереднім вимірюванням стовпця рідини. П'єзометричні рівнеміри (рис. 9.5) застосовують для вимірювання рівня найрізноманітніших, зокрема агресивних і в'язких рідин у відкритих резервуарах і в посудинах під тиском.

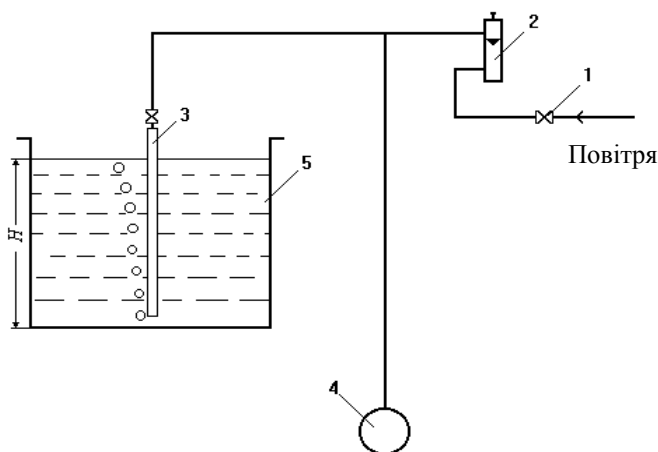


Рисунок 9.5 – П'єзометричний рівнемір із продуванням повітря:
1 – дросель; 2 – ротаметр; 3 – п'єзометрична трубка;
4 – манометр; 5 – посуд

Стиснене повітря або газ, пройшовши регульований дросель і ротаметр 2, потрапляє в п'єзометричну трубку 3, що знаходиться в резервуарі. Тиск повітря (газу), який вимірюють

манометром 4 будь-якої системи, характеризує стан рівня рідини в посудині 5.

З початку подавання повітря тиск буде підвищуватися доти, поки не стане рівним тиску стовпця рідини висотою H .

У момент вирівнювання цих тисків із трубки в рідину почне виходити повітря, витрати якого регулюють так, щоб він лише барботував окремими бульбашками (приблизно одна бульбашка за секунду). За більшої витрати тиск, вимірюваний дифманометром, може бути трохи більшим ніж гідростатичний тиск через додаткове падіння тиску, що виникає завдяки тертя газу об стінки трубки під час його проходження. За дуже малої витрати газу збільшується інерційність вимірювання. Обидва фактори можуть збільшити похибку вимірювання рівня.

Величину витрати повітря встановлює дросель 1, а контроль здійснює ротаметр 2.

Під час вимірювання рівня рідин необхідно враховувати можливість утворення за певних умов статичної електрики. Тому під час контролю легкозаймистих і вибухонебезпечних рідин (сірковуглець, бензол, масла тощо) за стиснений газ застосовують двоокис вуглецю, азот, димові гази.

П'єзометричні рівнеміри дозволяють вимірювати рівень у широких межах (від декількох десятків сантиметрів до 10–15 м).

Іншим видом гідростатичних рівнемірів є дифманометр будь-якої системи, що вимірює тиск стовпця рідини в посудині. Дифманометрами можна вимірювати рівень у відкритих і закритих посудинах, тобто в посудинах, що перебувають під тиском і розрідженням. На рисунку 9.6 а показана схема трубних з'єднань під час вимірювання рівня у відкритому резервуарі та встановлення дифманометра нижче ніж дно резервуара.

Під час використання дифманометрів для вимірювання рівня обов'язково встановлюють зрівняльну посудину, наповнену до певного рівня тою самою рідиною, що і в резервуарі. Призначення зрівняльної посудини – забезпечення стовпця рідини незмінної висоти в одному з колін дифманометра. Висота стовпця рідини в другому коліні дифманометра змінюється зі зміною рівня рідини в резервуарі.

Кожному значенню рівня в резервуарі відповідає певне значення перепаду тиску, що дозволяє за величиною перепаду, що показує дифманометр, дізнатися стан рівня рідини в резервуарі.

На рисунку 9.6 б показана схема з'єднання дифманометра під час вимірювання рівня рідини в посудині, що розміщена під тиском, і під час установки дифманометра нижче ніж дно посудини. У цьому разі зрівняльну посудину встановлюють на висоті максимального рівня і з'єднують з контрольованою посудиною.

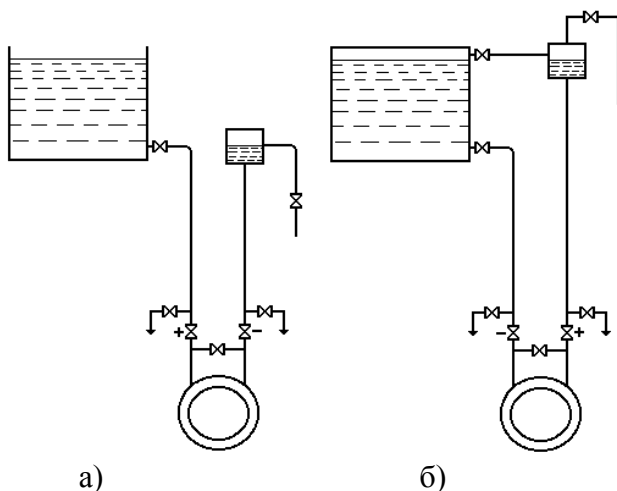


Рисунок 9.6 – Гідростатичні рівнеміри з безпосереднім вимірюванням стовпця рідини:

- а) під час вимірювання рівня рідини у відкритому резервуарі;
- б) під час вимірювання рівня рідини в резервуарі, що міститься під тиском

Під час вимірювання рівня агресивної рідини дифманометр повинен бути захищений від дії агресивного середовища. В цьому разі дифманометр захищають розділовими судинами або мембранними роздільниками, що дозволяє заповнити його камери і трубки неагресивною рідиною.

Точність вимірювання рівня п'єзометричними рівнемірами може бути істотно збільшена, якщо як засіб вимірювання

гідростатичного тиску використати автоматичний цифровий манометр дискретно-безпервної дії.

9.6 Електричні засоби вимірювання рівня

За видом чутливого елемента електричні засоби вимірювання рівня поділяють на ємнісні й кондуктометричні.

9.6.1 Ємнісні рівнеміри

Робота таких рівнемірів заснована на різниці діелектричних проникностей рідини й повітря. Найпростіший первинний перетворювач ємнісного приладу являє собою електрод (металевий стрижень або дріт), розміщений у вертикальній металевій трубці. Стрижень разом із трубкою утворюють конденсатор. Ємність такого конденсатора залежить від рівня рідини, оскільки під час його зміни від нуля до максимуму діелектрична проникність буде змінюватися від діелектричної проникності повітря до діелектричної проникності рідини.

Ємнісний рівнемір зазвичай складається з ємнісного циліндричного перетворювача і вторинного приладу.

Принципова схема вимірювання рівня рідин за допомогою

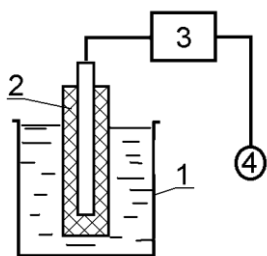


Рисунок 9.7 – Схема вимірювання ємнісним рівнеміром:

- 1 – посудину з рідиною;
- 2 – електрод;
- 3 – електронний блок;
- 4 – вимірювальний прилад

ємнісного рівнеміра показана на рисунку 9.7. У посудину з рідиною 1, рівень якої необхідно вимірювати, занурений електрод 2, покритий ізоляційним матеріалом. Електрод 2 разом зі стінками посудини утворює циліндричний конденсатор, ємність якого змінюється під час коливань рівня рідини. Величину ємності вимірюють електронним блоком 3, який потім передає сигнал у вимірювальний прилад 4, що являє собою релейний елемент

у схемах сигналізації досягнення певного рівня або прилад, що показує, в схемах вимірювання рівня.

Під час вимірювання висоти рівня агресивних, але не електропровідних рідин, електроди перетворювача виготовляють із хімічно стійких сплавів або покривають тонкою антикорозійною плівкою (вініпласт або фторопласт), діелектричні властивості якої враховують під час розрахунку. Покриття електродів тонкими плівками, що мають високі ізолюючі властивості, застосовують і під час вимірювання рівня електропровідної рідини.

Вимірювання електричної ємності зазвичай виконують за допомогою мостових і резонансних схем.

Під час *мостового методу* контрольовану ємність підключають до одного з плечей моста (див. рис. 4.19 б). Під час вимірювання рівня змінюється ємність, що викликає розбалансування моста. Сигнал розбалансування через підсилювач подають на електричний прилад, що показує, градуйований в одиницях контрольованого рівня. Мостовий метод використовують у більшості ємнісних рівнемірів.

Під час *резонансного методу* контрольована ємність, яку підключають паралельно з контуром індуктивності, утворює резонансний контур, налаштований на резонанс живильної частоти за певної початкової ємності перетворювача, яка відповідає наявності або відсутності контрольованої речовини на заданому рівні. Якщо ємності перетворювача змінюються, то це призводить до зміни власної частоти контура і зривання резонансу. Цей метод використовують у більшості ємнісних сигналізаторів рівня.

Ємнісні рівнеміри можуть вимірювати рівень не лише рідин, а і твердих сипучих матеріалів: цементу, вапна тощо.

9.6.2 Кондуктометричні сигналізатори рівня

Рівнеміри цього виду призначені для сигналізації рівня електропровідних рідких середовищ і сипучих середовищ із питомою провідністю більше ніж 10^{-3} См/м. Принцип дії кондуктометричних сигналізаторів заснований на замиканні електричного кола джерела живлення через контрольоване

середовище, що являє собою ділянку електричного ланцюга з певним омичним опором.

Сигналізатор (рис. 9.8) складається з двох вузлів: перетворювача і блоку живлення.

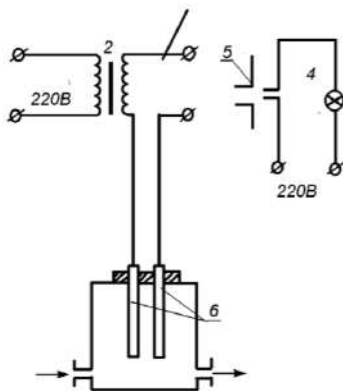


Рисунок 9.8 – Сигналізатор рівня електропровідних рідин:

- 1 – перетворювач;
- 2 – трансформатор;
- 3 – реле;
- 4 – сигнальна лампа;
- 5 – контакти реле;
- 6 – електроди

До складу перетворювача входять два ізольованих один від одного електроди 6 з клемми для приєднання дротів. Блок живлення складається з понижувального трансформатора 2, що понижує напругу живлення, і реле 3. Якщо рівень рідини нижчий ніж довжина електродів, електричний ланцюг між електродами розімкнений. Коли рівень рідини підвищиться, електроди замкнуться і по ланцюгу буде проходити струм. У вторинній обмотці трансформатора буде індукуватися напруга, по котушці реле 3 пройде струм і контакти 5 замкнуть ланцюг сигнальної лампи 4.

Живлення приладу може бути здійснено постійною напругою до 24 В або змінною напругою до 36 В. Величина напруги залежить від провідності контролюваного середовища, а рід струму – від властивостей контролюваного середовища.

Основним недоліком електричних рівнемірів є неможливість їх застосування у в'язких середовищах, що кристалізуються, дають тверді опади або налипають на електродах перетворювача.

9.7 Акустичні засоби вимірювання рівня

Існує декілька типів акустичних рівнемірів, у яких використовують різні принципи побудови. За *принципом дії* акустичні рівнеміри можна поділити на локаційні, поглинання і резонансні.

У *локаційних ультразвукових рівнемірах* використовують ефект відбиття ультразвукових коливань від межі поділу рідина – газ, у зв'язку з чим вони одержали назву ультразвукових.

У *рівнемірах поглинання* положення рівня визначають за ослабленням інтенсивності ультразвуку під час проходження крізь шари рідини й газу.

У *резонансних рівнемірах* вимірювання рівня здійснюють за рахунок вимірювання частоти власних коливань стовпця газу над рівнем рідини, яка залежить від висоти рівня.

Але найбільшого поширення набули локаційні рівнеміри.

Відповідно до цього принципу вимірювання рівня здійснюють за часом проходження ультразвуковими коливаннями відстані від випромінювача до межі поділу двох середовищ і зворотно до приймача випромінювання. Локацію межі поділу двох середовищ здійснюють або з боку газу, або з боку робочого середовища (рідини або сипучого матеріалу). Якщо випромінювач ультразвуку розміщений над рідиною, то рівнемір називають *акустичним*; якщо всередині рідини – *ультразвуковим*. У першому випадку вимірюваний час буде тим більший, чим нижче знаходиться рівень рідини, у другому – навпаки.

Перевагою акустичних рівнемірів є незалежність їх показань від фізико-хімічних властивостей і складу робочого середовища. Це дозволяє використовувати їх для вимірювання рівня неоднорідних, таких, що кристалізуються і випадають в осадок рідин. До недоліків необхідно віднести вплив на показання рівнемірів температури, тиску і складу газу.

Зазвичай акустичні рівнеміри являють собою поєднання первинного, проміжного, а у певних випадках і передавального вимірювального перетворювача. Тому акустичні рівнеміри

необхідно розглядати як частину вимірювальної системи з акустичними вимірювальними перетворювачами.

На рисунку 9.9 наведена схема акустичного рівнеміра рідких середовищ. Рівнемір складається з первинного *I* та проміжного *II* перетворювачів. Первинний перетворювач являє собою п'єзоелемент, що виконує одночасно функції джерела і приймача ультразвукових коливань. Під час вимірювання генератор із певною частотою виробляє електричні імпульси, які п'єзоелементом *I* перетворюють в ультразвукові імпульси. Останні поширюються уздовж акустичного тракту, відбиваються від межі поділу рідина – газ і беруться тим самим п'єзоелементом, що перетворює їх в електричні імпульси.

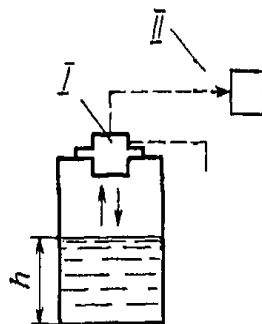


Рисунок 9.9 – Схема акустичного рівнеміра

Відстань між первинним і проміжним перетворювачами не повинна перевищувати 25 м; діапазони вимірювання рівня становить 0–3 м; клас точності відповідає 2,5.

Акустичні рівнеміри сипучих середовищ за принципом дії і будовою аналогічні акустичним рівнемірам рідких середовищ.

9.8 Радіоізотопні рівнеміри

Для безперервного вимірювання рівня рідин (агресивних, горючих та ін.) без контакту з ними можуть бути застосовані *радіоізотопні* рівнеміри. Такі рівнеміри застосовують для вимірювання рівня рідин і сипучих матеріалів у закритих ємностях.

Принцип їх дії заснований на вимірюванні різниці інтенсивності гамма-променів радіоізотопів певних речовин під час їхнього проходження крізь речовину, що заповнює резервуар. Можливі три принципові схеми радіоізотопних рівнемірів (рис. 9.10).

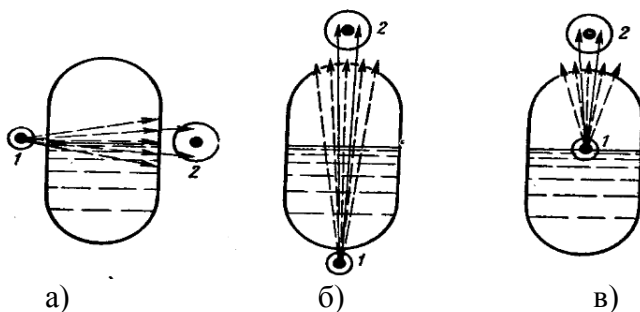


Рисунок 9.10 – Принципові схеми радіоізотопних рівнемірів:
 1 – випромінювач;
 2 – приймач випромінювання

Схеми, наведені на рис. 9.10 а і б, застосовують у тому разі, коли немає доступу до посудини. Схему, наведену на рис. 9.10 а, можна застосовувати як сигналізатор максимального або мінімального рівня (під час нерухомого випромінювача і приймача випромінювання) або для неперервного вимірювання рівня (рівнеміри зі системою, що стежить).

За невеликого стовпця рідини (до 1 м для легких рідин) можна застосовувати схему, показану на рис. 9.10 б. Схему, наведену на рис. 9.10 в, доцільно застосовувати в тому разі, коли в посудину можна помістити поплавок.

Принцип дій радіоізотопного рівнеміра розглянемо на прикладі сигналізатора рівня, наведеного на рисунку 9.10 а. Слабке гамма-випромінювання від джерела радіоізотопного випромінювання 1 (це може бути або радіоактивний Кобальт Co^{60} , або Цезій 137), проникаючи крізь стінки резервуара і його внутрішню порожнину, вловлює і перетворює приймач-детектор 2, за який використовують звичайний лічильник Гейгера. У лічильнику Гейгера, під час впливу гамма-випромінювання, відбувається іонізація газу, що його заповнює. Завдяки тому, що до електродів лічильника прикладений високий електричний потенціал, виникає імпульсний струм, частота імпульсів якого прямо пропорційна інтенсивності потоку гамма-випромінювання.

У разі заповнення резервуара сипучим або рідким середовищем частина гамма-випромінювання поглинається, внаслідок цього, на приймальному пристрої рівнеміра спостерігають зниження рівня випромінювання. Це спричиняє зменшення частоти імпульсів від лічильника Гейгера.

Отже, радіаційне випромінювання йде від випромінювача до приймача, які розміщують на протилежних стінках ємності або резервуара. Гамма промені на своєму шляху проходять або крізь повітря, в разі, коли рівень середовища не досягне позначки, на якій встановлений рівнемір, або безпосередньо крізь продукт, рівень якого і контролюють. Повітряне середовище не здатне забезпечити сильне загасання радіоактивного сигналу. У разі, коли рівень вимірюваного середовища вищий ніж позначка, на якій встановлені випромінювач і приймальний пристрій, то радіоактивне випромінювання буде проходити крізь товщу цього середовища, що зменшить його інтенсивність, оскільки щільне середовище має властивість поглинати радіацію набагато сильніше за повітряне середовище.

Експлуатацію радіоізотопних рівнемірів здійснюють у суворій відповідності до інструкції підприємства-виробника і санітарних вимог. Через небезпеку для обслуговуючого персоналу радіаційного опромінення зазначені рівнеміри мають обмежене застосування.

Радіоізотопні рівнеміри не можуть бути застосовані для вимірювання й сигналізації рівня в харчовій промисловості. Проте існують ситуації, коли без радіоізотопного рівнеміра не обійтися. За приклади можна навести вимірювання рівня розплавленого металу в печах або в процесі безперервної виливання. Тому радіоізотопні рівнеміри мають повне право на існування й активну експлуатацію. Просто використовувати такий рівнемір можна не для всіх технологічних процесів.

10 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ТА КІЛЬКОСТІ РЕЧОВИНИ

10.1 Одиниці та методи вимірювання витрати й кількості речовини

Витрата речовини – це кількість речовини, що проходить в одиницю часу по трубопроводу, каналу тощо. Кількість і витрату речовини виражають в об'ємних або масових одиницях вимірювання. Об'ємними одиницями кількості зазвичай є літр (л) і кубічний метр (м³), а масовими – кілограм (кг) і тонна (т). Найпоширенішими одиницями об'ємної витрати є л/год, м³/с і м³/год, а масової – кг/с, кг/год і т/год.

Перехід від об'ємних одиниць витрати до масових і навпаки обчислюють за формулою

$$Q_m = Q_{об} \cdot \rho, \quad (10.1)$$

де Q_m – масова витрата речовини, кг/год;

$Q_{об}$ – об'ємна витрата речовини, м³/год;

ρ – густина речовини, кг/м³.

Прилади, що вимірюють витрати, називають *витратомірами*. Залежно від виду вимірювальної речовини їх поділяють на витратоміри води, пари, газу тощо. Витратоміри бувають показувальними і самописними. Часто їх забезпечують вбудованим рахунковим механізмом (інтегратором).

До приладів, що вимірюють кількість, належать лічильники і ваги. За їх допомогою визначають кількість речовини, яка пройшла по тракту за відомий проміжок часу, для чого відраховують показання приладу на початку і в кінці періоду вимірювання і обчислюють різницю цих показань.

У виробництві найчастіше застосовують такі види витратомірів:

1) *витратоміри змінного перепаду тиску*, що вимірюють витрати методом дроселювання потоку звужуючим пристроєм постійного перерізу, що встановлюють у трубопроводі;

2) *витратоміри змінного рівня*, що вимірюють висоту рівня рідини, що тече через посудину;

3) *витратоміри постійного перепаду тиску*, що вимірюють витрати за рахунок дроселювання потоку звужуючим пристроєм змінного перерізу;

4) *електромагнітні (індукційні) витратоміри*;

5) *ультразвукові витратоміри*.

10.2 Витратоміри змінного перепаду тиску

Найбільш поширеним і вивченим методом вимірювання витрат рідини, пару і газу є метод змінного перепаду тиску. Принцип дії витратомірів із звужуючим пристроєм заснований на зміні потенціальної енергії вимірювальної речовини під час проходження через штучно звужений перетин трубопроводу. Внаслідок місцевого стиснення потоку і відповідного збільшення швидкості потоку частину потенційної енергії перетворюють у кінетичну енергію. Зміна потенціальної енергії призводить до появи різниці статичних тисків (перепаду тиску), що визначають за допомогою дифманометра.

Витратомір складається із звужуючого пристрою, змонтованого в трубопроводі для створення місцевого стиску потоку (первинний перетворювач), диференціального манометра, призначеного для вимірювання різниці статичних тисків середовища, що має перебіг, до і після звужуючого пристрою (вторинний прилад), і сполучних ліній (двох труб), що зв'язують між собою обидва прилади.

У вимірювальній техніці за звужуючі пристрої використовують нормальні діафрагми і сопла. Найбільш простим і поширеним звужуючим пристроєм є стандартна діафрагма.

На рисунку 10.1 наведені схема встановлення в трубопроводі діафрагми у вигляді тонкого диска із круглим отвором посередині та зображення характеру потоку. Там само показано розподіл статичного тиску P за довжиною потоку l .

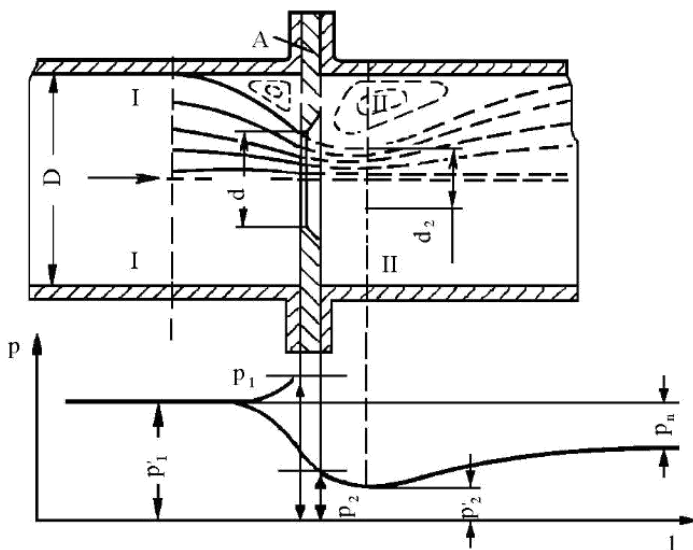


Рисунок 10.1 – Характер потоку під час встановлення діафрагми

Діафрагма (рис. 10.1) – це тонкий диск А, встановлений у трубопроводі так, щоб його отвір діаметром d був концентричним внутрішнім стінкам трубопроводу. Звуження потоку починають до діафрагми, потім на деякій відстані за нею завдяки дії сил інерції потік звужують до мінімального перетину d_2 , а далі поступово розширюють до повного перерізу трубопроводу (внутрішній діаметр D). Перед діафрагмою і за нею утворюються зони з вихровим рухом, причому зона вихорів за діафрагмою більша, ніж перед нею.

Тиск потоку біля стінки трубопроводу (суцільна лінія) трохи зростає завдяки підпору перед діафрагмою і знижується до мінімуму за діафрагмою в найбільш вузькому перерізі струменя II-II. Далі, через розширення потоку, тиск біля стінки знову підвищується, але не досягає попереднього значення. Залишкову втрату частини тиску P_n пояснюють, головним чином, втратами енергії на завихрення, удар і тертя. Різниця тисків $p_1 - p_2$ є

перепадом, який залежить від витрат середовища, що проходить у трубопроводі.

Під час вимірювання витрат за методом змінного перепаду тиску речовина, що протікає, має цілком заповнювати всі перерізи трубопроводу і звужуючого пристрою; потік у трубопроводі повинен бути практично сталим, фазовий стан речовини не повинен змінюватися під час проходження через звужуючий пристрій (рідина не повинна випаровуватися, пар залишається перегрітим тощо).

Об'ємні витрати $Q_{об}$ пов'язані з перепадом тиску $\Delta P = p_1 - p_2$ таким співвідношенням:

$$Q_{об} = b S_0 \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta P}{\rho}}, \quad (10.2)$$

де b – коефіцієнт витрат;
 S_0 – переріз отвору діафрагми, м²;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 ρ – густина рідини, кг/м³.

Діафрагму можна виготовляти з будь-яких матеріалів, під час вибору яких необхідно враховувати властивості вимірюваного середовища. Точність вимірювання витрати за допомогою діафрагм залежить від ступеня гостроти входної крайки отвору, що впливає на значення коефіцієнта витрати b . Роз'їдання гострої крайки діафрагми різко змінює коефіцієнт витрат b , вимірювання стають неточними. Тому для робочої частини діафрагми необхідно вибирати матеріал, стійкий до корозії, ерозії та механічного зносу, тобто нержавіюча сталь, а в деяких випадках – латунь або бронза.

Сопло використовують у разі, коли необхідно зменшити вплив корозії та ерозії звужуючого пристрою на результати вимірювання. Нормальне сопло (рис. 10.3) являє собою коротку лійкоподібну насадку, встановлену концентрично в трубопроводі. Сопло Вентурі (рис. 10.4) складається з профільної входної,

циліндричної середньої і конічної вихідної частин. Профільну частину сопла Вентурі виконують так само, як у нормального сопла.

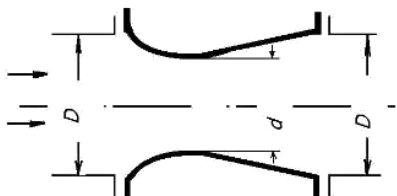
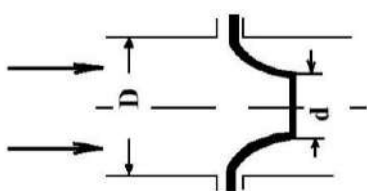


Рисунок 10.3 – Нормальне сопло Рисунок 10.4 – Сопло Вентурі

Характер потоку і розподіл тиску однакові в усіх типах звужуючих пристроїв. Внаслідок того, що потік, який тече через сопло, майже не відривається від його профільованої частини, втрати на завихрення виникають в основному за соплом, тому залишкова втрата тиску в ньому менша порівняно з діафрагмою.

Ще менші втрати тиску в соплі Вентурі, профіль якого близький до перетину потоку, що тече через звуження. Це фізично пояснюють наявністю дифузора на виході, завдяки якому йде відновлення потенціальної енергії.

Нормальні сопла особливо зручні під час вимірювання витрат газів і перегрітої пари, а також під час вимірювання витрат пару високого тиску в трубопроводах діаметром $D \leq 200$ мм. Порівняно з діафрагмами вони менш чутливі до корозії, забруднень і забезпечують трохи більшу точність вимірювання.

Сопла Вентурі можуть застосовуватися без індивідуального градуювання для діаметрів трубопроводів $D \leq 50$ мм.

Для вимірювання перепаду тиску в звужуючому пристрої застосовують диференціальні манометри різної будови з безпосереднім показанням або записом витрат, або з передачею вимірюваної величини на вторинні показувальні, регульовальні, підсумовуючі та самописні прилади.

Зв'язок між дифманометром-витратоміром і звужуючим пристроєм здійснюють двома з'єднувальними трубками.

Зазвичай застосовують мідні, алюмінієві, сталеві й пластмасові (з вініласту або поліетилену) трубки.

Істотне значення мають діаметр і довжина з'єднувальних трубок. За малих діаметрів трубки легко засмічуються, в них утворюються водяні пробки або повітряні бульбашки. Внаслідок підвищеного опору в трубках збільшується час запізнювання дифманометра. Занадто великі діаметри небажані через громіздкість проводки і збільшення витрат металу, а в разі вимірювання витрат газу також через шкідливий вплив об'єму на час запізнювання дифманометра. Рекомендують застосовувати трубки з внутрішнім діаметром 10–12 мм, але не меншим ніж 8 мм.

Довжина з'єднувальних трубок залежить від відстані між звужувальним пристроєм і дифманометром. Зі збільшенням довжини з'єднувальних трубок збільшується запізнювання в передачі імпульсів. Тому завжди потрібно застосовувати короткі з'єднувальні лінії, застосовуючи за потреби дифманометри з дистанційною передачею на вторинний прилад. Довжина з'єднувальних трубок не повинна перевищувати більше ніж 50 м.

До переваг цього методу належать такі: простота та надійність, відсутність рухомих частин, легкість серійного виготовлення засобів вимірювання практично на будь-які тиски та температури вимірювального середовища, низьку вартість, можливість вимірювання практично будь-яких витрат і можливість одержання градуйованої характеристики витратомірів розрахунковим методом, тобто без використання дорогих метрологічних установок.

10.3 Витратоміри змінного рівня

Принцип роботи витратомірів змінного рівня заснований на вимірюванні висоти рівня рідини в посудині під час вільного стікання її через отвір у бічній стінці посудини. Ці прилади застосовують у хімічній промисловості для вимірювання витрат особливо активних рідин. Їх можуть також застосовувати для вимірювання витрат пульсуючих потоків і рідин, змішаних із газом.

У всіх випадках вимірювання витрат рідини витратомірами змінного рівня відбувається під час атмосферного тиску, що значно обмежує їх застосування.

Витратомір змінного рівня має приймальну ємність (посудина) з отвором витікання тієї чи іншої форми і вимірювач рівня рідини. Для вимірювання рівня можуть застосовуватися будь-які стандартні прилади. Прийомними ємностями є зазвичай циліндричні або прямокутні посудини зі щільним отвором витікання. У таких судинах витрати визначають за висотою рівня рідини над нижньою кромкою отвору.

Витратомір, наведений на рисунку 10.5, являє собою прямокутний корпус 2 з двома штуцерами: бічним – для введення вимірюваної рідини та нижнім – для зливання рідини у відкритий приймач.

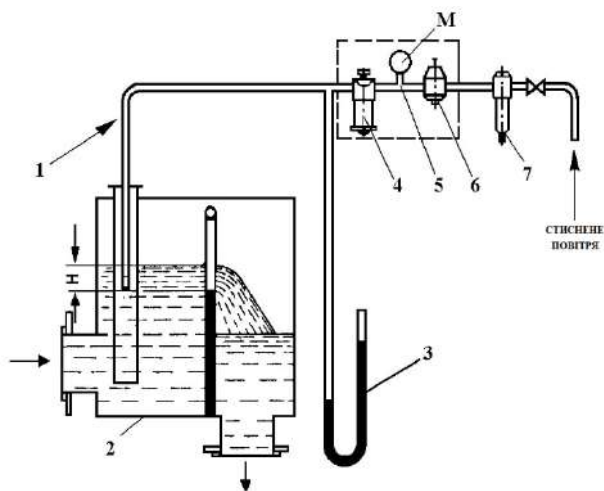


Рисунок 10.5 – Схема витратоміра з щільним отвором витікання:

- 1 – п'єзометрична трубка; 2 – корпус; 3 – дифманометр;
- 4 – контрольний стаканчик; 5 – манометр; 6 – редуктор;
- 7 – фільтр

У середині корпус поділений глухою перегородкою, до якої герметично прикріплений щит з профільованою щільною. У

посудині перед зливною щілиною занурена в захисному чохлі п'єзометрична трубка 1, через яку безперервно продувають повітря. Кількість поданого повітря контролюють за допомогою контрольного стаканчика 4, а тиск повітря підтримують постійним за допомогою редуктора 6. Для очищення повітря використовують фільтр 7.

Тиск у п'єзометричній трубці однозначно пов'язаний із густиною і висотою стовпця рідини перед щілиною, а отже, і з масовою витратою рідини. Величину гідростатичного напору в п'єзометричній трубці вимірюють дифманометром 3.

10.4 Витратоміри постійного перепаду тиску

Найбільш поширеними приладами групи витратомірів постійного перепаду тиску є *ротаметри*. Шкали ротаметрів практично рівномірні, ними можна вимірювати невеликі витрати, втрати тиску в них незначні і не залежать від величини витрат.

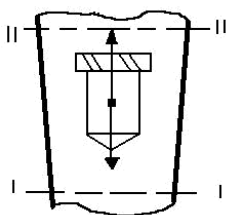


Рисунок 10.6 –
Схема ротаметра

Схема ротаметра наведена на рисунку 10.6. Потік рідини або газу, що проходить через ротаметр знизу, піднімає поплавок доти, поки розширююча кільцева щілина між тілом поплавка і стінками конусної трубки не досягне величини, за якої сила тяжіння, сила тиску потоку на верхню площину поплавка, сила тиску потоку на нижню поверхню поплавка та сила тертя потоку об поплавок, що діють на поплавок, врівноважують один одного, і він встановлюється на тій чи іншій висоті залежно від величини витрат.

Ротаметри виконують зі скляної або металевої трубки. Шкала в ротаметрах зі скляної трубки витравлена на самій трубці, і відлік здійснюють по верхній горизонтальній площині поплавка.

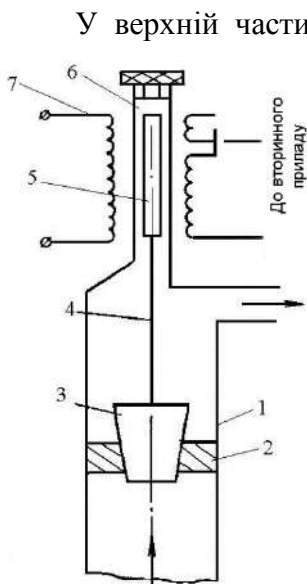


Рисунок 10.7 – Схема ротаметра з електричною дистанційною передачею:

- 1 – корпус;
- 2 – діафрагма;
- 3 – поплавок;
- 4 – шток;
- 5 – сердечник;
- 6 – роздільна трубка;
- 7 – котушка

У верхній частині поплавок часто роблять косі прорізи, завдяки чому поплавок обертається навколо вертикальної осі. Під час обертання поплавок центрується всередині трубки, не стикаючись зі стінками, за рахунок чого його чутливість підвищується.

Ротаметри зі скляною трубкою виготовляють для рідини або газу з тиском, що не перевищують 6 кгс/см^2 . За більш високих тисків рідини або газу і для вимірювання витрати пари застосовують ротаметри з металевою трубкою. У таких ротаметрах використовують електричну або пневматичну дистанційні передачі.

На рисунку 10.7 наведена принципова схема ротаметра з електричною диференціально-трансформаторною передачею показань на відстань. Вимірювальна частина ротаметра складається з циліндричного металевого корпусу 1 з діафрагмою 2, в отворі якої переміщується конусний поплавок 3, жорстко насаджений на шток 4. На верхньому кінці штока закріплений сердечник 5 диференціально-трансформаторного перетворювача.

Сердечник рухається всередині роздільної трубки 6, зовні якої знаходиться котушка 7 перетворювача.

Ротаметри з металевою трубкою можуть бути безшкальними і показувальними. Безшкальні ротаметри працюють у комплекті зі вторинними диференціально-трансформаторними показувальними або реєструвальними приладами.

Ротаметри з металевою трубкою розраховані на робочий тиск до 64 кгс/см^2 . Межі вимірювання витрат (у розрахунку на воду) становлять від $0,7 \cdot 10^{-5}$ до $0,44 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$.

Для вимірювання витрати у вибухонебезпечних і пожежонебезпечних умовах застосовують ротаметри з пневматичною дистанційною передачею.

10.5 Електромагнітні (індукційні) витратоміри

Розглянені вище методи вимірювання витрати речовини характеризують тим, що чутливий елемент приладу перебуває безпосередньо у вимірювальному середовищі, тобто зазнає механічного і хімічного її впливу і спричиняє втрату тиску потоку. Безперервна дія вимірювального середовища на чутливий елемент із часом негативно впливає на точність, надійність і термін служби приладу. З іншого боку, самі чутливі елементи, перебуваючи в потоці, впливають на його аеродинамічні характеристики, що призводить до появи додаткової похибки вимірювання.

Для вимірювання витрати хімічно агресивних (кислоти, луги), абразивних (пульпи) та інших рідин, які пошкоджують матеріал частин витратоміра, що дотикаються, описані вище методи і прилади взагалі непридатні.

Існує ряд приладів для вимірювання витрати рідини, чутливий елемент яких не має безпосереднього з нею контакту, що дозволяє застосовувати їх для агресивних середовищ. До таких приладів належать електромагнітні (індукційні) витратоміри.

Електромагнітні витратоміри застосовують для вимірювання витрати електропровідних рідин. Їх використовують для вимірювання в трубопроводах об'ємних витрат водопровідної води, різних розчинів (солей, кислот), пульп, розплавлених металів та інших електропровідних рідин, електрична провідність яких повинна бути не меншою за електропровідність водопровідної води. Дія електромагнітних витратомірів ґрунтується на тому принципі, що під час проходження в трубопроводі електропровідної рідини поперек

силових ліній магнітного поля іони, що знаходяться в рідині, зміщуються і віддають свої заряди вимірювальним електродам, створюючи в них ЕРС E , пропорційну швидкості течії рідини. Величину цієї ЕРС визначають за формулою

$$E = B \cdot l \cdot v_{\text{сеп}} = \frac{4 \cdot B \cdot Q}{\pi \cdot d}, \quad (10.3)$$

де B – магнітна індукція;

l – відстань між кінцями електродів у трубі з внутрішнім діаметром d ($l = d$), м;

$v_{\text{сеп}}$ – середня швидкість руху рідини, м/с;

Q – витрата рідини, що тече, м³/с.

Отже, електромагнітний витратомір являє собою невеликий гідродинамічний генератор змінного струму, що виробляє ЕРС E , пропорційну середній швидкості потоку $v_{\text{сеп}}$, а отже, і витраті рідини Q .

Вимірювання витрати рідини електромагнітним методом здійснюють під час використання як постійного магніту, так і магніту зі змінним магнітним полем. Зазначені способи створення магнітного поля мають свої позитивні й негативні сторони.

Схема електромагнітного витратоміра з постійним магнітним полем наведена на рисунку 10.8 а.

Корпус 1 – це відрізок труби, виконаний з немагнітного матеріалу і покритий зсередини електричною ізоляцією (гумою, емаллю, фторопластом тощо), розміщений між полюсами магніту 2. Магнітні силові лінії спрямовані перпендикулярно до вектора швидкості руху рідини. Крізь стінку труби ізольовано від неї введені електроди 3, які перебувають у контакт з рідиною. Вся інформація надходить у вимірювальний пристрій 4.

Перевагою електромагнітних витратомірів із постійним магнітним полем є те, що значно зменшується проблема, пов'язана з перешкодами від зовнішніх змінних електромагнітних полів, особливо під час застосування в

промислових умовах, де працюють електромотори, магнітні крани, трансформатори та інше електротехнічне устаткування. До переваг таких витратомірів потрібно віднести відсутність необхідності в джерелі живлення чутливих елементів, тобто самих електродів, розміщених на трубопроводі, що забезпечує безпеку його роботи, та ряд інших факторів.

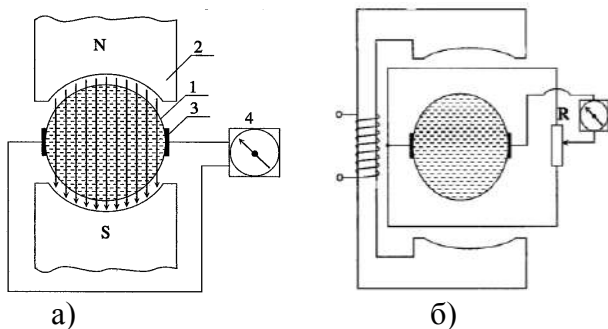


Рисунок 10.8 – Схема електромагнітного витратоміра:

а) з постійним магнітним полем;

б) зі змінним магнітним полем

Основним недоліком магнітних витратомірів із постійним магнітним полем є поляризація електродів, тобто виникнення у позитивного електрода негативних іонів, а у негативного електрода – позитивних іонів. Тому електромагнітні витратоміри з постійним магнітним полем не застосовують для рідин з іонною провідністю (кислоти, солі, водні розчини різних речовин тощо). Такі витратоміри набули застосування для вимірювання витрати рідких середовищ із електронною провідністю, до яких належать розплавлені рідкі метали (натрій, ртуть, залізовуглецеві розплави тощо) і в яких відсутнє явище поляризації. Можливе застосування таких витратомірів у атомних реакторах із розплавленим металевим теплоносієм, у плавильних і ливарних агрегатах на металургійних заводах тощо.

Для вимірювання витрати середовищ із іонною провідністю застосовують витратоміри зі змінним магнітним полем, створюваним електромагнітом (рис. 10.8 б). За досить високої

частоти електромагнітного поля поляризація електродів практично відсутня.

Електромагнітні витратоміри різних модифікацій мають вбудований у вимірювальний блок мікропроцесорний пристрій, що обробляє інформацію від датчика витрати, встановленого на трубопроводі, реєструє значення миттєвої витрати і кількості за певний проміжок часу, має можливість передавання даних на ЕОМ інтерфейсом та інші операції.

Електромагнітні витратоміри, що мають клас точності 0,5–1,0, застосовують на трубопроводах практично будь-яких діаметрів без обмеження верхньої межі за витратою. Їх показання не залежать від в'язкості та густини середовища. Датчик витрати (чутливий елемент), практично безінерційний, перебуває поза рухомим середовищем і отже, не створює витрати тиску. Перевагами електромагнітних витратомірів є такі:

- незалежність показань від в'язкості і густини вимірювального середовища;
- можливість застосування в трубах будь-якого діаметра;
- відсутність витрат тиску в потоці;
- необхідність меншої довжини прямих ділянок труб;
- висока швидкодія.

До основних недоліків електромагнітних витратомірів можна віднести такі:

- непридатні для вимірювання витрат газу і пари;
- непридатні для вимірювання витрати рідин-діелектриків (спирт, нафтопродукти тощо).

10.6 Ультразвукові витратоміри

Крім електромагнітних витратомірів як методи вимірювання витрат, в яких чутливі елементи перебувають поза рухомим середовищем, використовують ультразвукову хвилю, що надає інформацію про швидкість і витрату рухомого середовища у закритих і відкритих каналах. Такі методи дозволяють розширити кількість видів обмірюваних середовищ (розплавлені метали, кислоти, луги, агресивні й токсичні рідини, гази тощо).

В ультразвукових витратомірах використовують різні ефекти, пов'язані із поширенням ультразвуку через рухоме середовище: зміна швидкості ультразвуку в поздовжньому напрямку потоку; відхилення ультразвукової хвилі під час поперечного поширення в потоці; ефект Доплера тощо.

Найбільшого поширення набув метод вимірювання витрати, заснований на *вимірюванні різниці часу проходження ультразвуку за напрямком і протилежно напрямку потоку середовища*.

У таких приладах випромінювачі (п'єзоелементи) поширюють через рухоме середовище дві звукові хвилі в протилежних напрямках. Якщо середовище нерухоме, то обидві хвилі проходять ту саму відстань L до п'єзоелементів, що приймають ці хвилі, за однаковий час. Рухоме середовище прискорює одну звукову хвилю і сповільнює іншу. Різниця часу Δt проходження відстані L цими хвилями пропорційна швидкості руху v середовища. Одним зі способів вимірювання Δt є вимірювання різниці фаз змінних напрямків, які виникають на приймальних п'єзоелементах.

На рисунку 10.9 наведена схема двоканального ультразвукового витратоміра, в якому використовують частотний спосіб вимірювання часових інтервалів під час поширення ультразвуку в двох напрямках: у напрямку потоку і протилежно до нього.

Ультразвукові хвилі, утворені двома випромінювачами 1 і 3, проходять перетин каналу в двох напрямках і надходять на два приймачі, які перетворюють ультразвукові сигнали в електричні. За випромінювачі використовують п'єзокристали, які збуджують високочастотні електричні сигнали від генератора 2.

Приймачі 4 і 8 направляють електричні сигнали на відповідні реле 6, які керують роботою генератора 2 у режимі «увімкнено–вимкнено». Під час надходження сигналу на реле генератор вмикається, за відсутності сигналу – вмикається. Отже, генератор 2 працює в періодичному режимі, а час роботи і «мовчання» дорівнює часу поширення ультразвукових сигналів через рухоме середовище. Вимірювання часу роботи генератора

(часу поширення ультразвуку через трубопровід) виконують у часовому блоці.

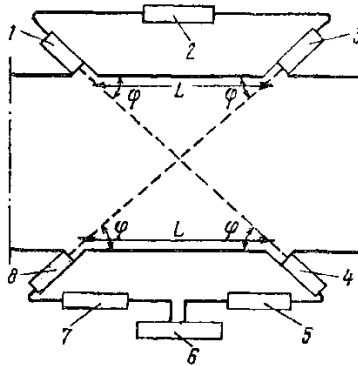


Рисунок 10.9 – Схема ультразвукового витратоміра:

- 1, 3 – п'єзoelementи, що випромінюють ультразвукові хвилі;
- 2 – генератор ультразвукових коливань;
- 4, 8 – п'єзoelementи, що приймають ультразвукові хвилі;
- 5, 7 – підсилювачі; 6 – фазометричний пристрій (реле)

Вираз для визначення витрати середовища (м³/с) під час використання частотного ультразвукового витратоміра такий:

$$Q = \frac{F \cdot L}{2} \cdot (f_1 - f_2), \quad (10.4)$$

де F – перетин трубопроводу (каналу), м²;

L – відстань між приймачами ультразвукового сигналу, м;

f_1 , f_2 – частота імпульсів під час прямого поширення ультразвуку і під час зустрічного поширення ультразвуку відповідно.

Як бачимо з формули (10.4), показання частотного витратоміра не залежить від швидкості поширення ультразвуку в середовищі, що є важливою перевагою такого методу вимірювання витрати рідких і газоподібних середовищ.

В інших типах витратомірів ультразвукову хвилю спрямовують перпендикулярно до осі труби, і за величиною відхилення ультразвукової хвилі від перпендикуляра визначають витрату або середню швидкість потоку. Зі збільшенням середньої швидкості потоку v напрямок ультразвукового сигналу зі швидкістю c усе більше відхиляється за напрямком швидкості потоку (рис. 10.10). Кут відхилення напрямку сигналу α буде визначатися таким виразом:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{v}{c}\right). \quad (10.5)$$

Зі збільшенням середньої швидкості середовища v кількість енергії, що надходить на приймач Π_1 , зменшується, а та, що надходить на приймач Π_2 – збільшується. Різниця сигналів від приймачів Π_1 і Π_2 збільшується зі зростанням середньої швидкості, а отже, і витрати надходять у витратомір V .

Витратоміри з такою схемою прості за будовою, але мають обмежену точність через мале відхилення хвилі. Крім того, швидкість ультразвуку, що входить у розрахункові формули витрати, може змінюватися під час зміни фізичних параметрів і складу вимірювального середовища, що вносить додаткову похибку.

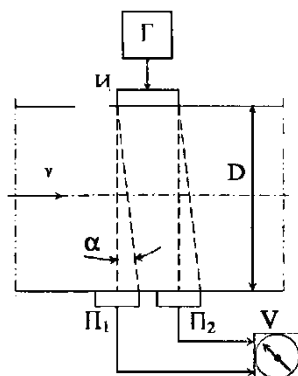


Рисунок 10.10 – Принцип дії ультразвукового витратоміра з вертикальним відхиленням ультразвуку

Розроблено інші типи ультразвукових витратомірів нового покоління, таких, як часоімпульсні та фазові. У *часоімпульсних витратомірах* періодично здійснюють вимірювання різниці часу поширення дуже коротких імпульсів тривалістю 0,1–0,2 мкс за рухом і протилежно руху середовища в трубопроводі. Вимірювальна різниця часу дуже мала навіть за великих швидкостях руху середовища, що вимагає застосування електронних вимірювальних систем підвищеної точності. Крім того, показання таких витратомірів залежать від зміни швидкості ультразвуку в середовищі. Такі витратоміри застосовують в основному для вимірювання витрати рідких середовищ, для яких у процесі вимірювання істотно не змінюються такі параметри, як густина, температура, тиск.

У *фазових ультразвукових витратомірах* використовують ефект Доплера, тобто вимірюють різницю фаз ультразвукових коливань, які поширюються за потоком і протилежно до нього. Недоліком таких витратомірів також є залежність показань від зміни швидкості ультразвуку в середовищі.

Розроблені різні модифікації ультразвукових часоімпульсних і доплерівських (фазових) витратомірів, які застосовують у нафтовій, металургійній, хімічній та інших галузях промисловості для вимірювання витрати мазуту, нафти, нафтопродуктів та інших рідин, зокрема середовищ, забруднених твердими і газоподібними включеннями. Перевагою таких витратомірів є широкий діапазон вимірювальних витрат від 0,45 м³/год до 110 тис. м³/год для трубопроводів діаметром від 40 мм до 1 800 мм із похибкою вимірювання не більшою ніж 2 %.

Сучасні ультразвукові витратоміри комплектують вбудованими мікропроцесорами, які забезпечують оброблення інформації, що надходить від датчиків, вимірювання та індикацію витрати середовища (за годину, добу, місяць), формування уніфікованого струмового сигналу під час використання системи автоматичного регулювання, введення необхідних коригувальних і керуючих команд тощо.

Ультразвукові витратоміри є найбільш перспективними приладами для вимірювання витрат різних рідких і газоподібних середовищ. Найбільшу точність вимірювання мають

одноканальні ультразвукові витратоміри з урізаними датчиками, похибка яких не перевищує 0,3 %.

10.7 Швидкісні витратоміри та лічильники

Швидкісний метод визначення витрати й кількості рідини та газу покладений в основу ряду витратомірів і лічильників, що мають досить просту будову і значний діапазон показань. Принцип дії цих приладів полягає у вимірюванні середньої швидкості потоку $v_{сер}$, пов'язаної з об'ємною витратою $Q_{об}$ (м³/с) речовини залежністю

$$Q_{об} = v_{сер} \cdot F, \quad (10.6)$$

де $v_{сер}$ – середня швидкість потоку, м/с;

F – поперечний переріз потоку, м².

За виконанням і призначенням швидкісні витратоміри та лічильники поділяють на швидкісні витратоміри та лічильники рідини, напірні трубки й анемометри.

10.7.1 Швидкісні лічильники рідини

Їх найчастіше застосовують для вимірювання об'єму води й тому називають лічильниками води. Чутливим елементом їх є лопатева вертушка, яку обертає потік рідини. Вісь вертушки за допомогою передавального механізму (редуктора), що зменшує частоту обертання, зв'язана з рахунковим пристроєм приладу. Отже, залежність витрати рідини $Q_{об}$, що протікає через швидкісний лічильник, визначають так:

$$Q_{об} = \frac{n \cdot F}{C}, \quad (10.7)$$

де n – частота обертання вертушки, об/хв;

F – поперечний переріз потоку, м².

C – сталий коефіцієнт.

З формули (10.7) бачимо, що частота обертання вертушки пропорційна витраті рідини, завдяки чому будова приладу значно спрощується. Однак за дуже малих витрат спостерігають відхилення від цієї залежності внаслідок перетікання рідини через проміжки між вертушкою і корпусом приладу та тертя механізму в опорах. Формула (10.7) виконується лише за відсутності завихрення рухомої рідини місцевими опорами (вигинами трубопроводу, вентилями тощо) поблизу лічильника.

Характерною величиною швидкісних лічильників рідини (як і інших лічильників) є так званий поріг початку показань, що виражає найменшу витрату речовини, нижче якого лічильник перестав давати безперервні показання.

Швидкісні лічильники виготовляють для вимірювання кількості холодної (до температури 30 °С) і гарячої (до 90 °С) води за робочого тиску до 1 МПа. Вертушку виконують із пластмаси або металу.

Істотним недоліком швидкісних лічильників є залежність показань від в'язкості вимірювальної рідини.

За формою вертушки швидкісні лічильники поділяють на крильчасті і турбінні. Вертушка перших має прямі лопаті, спрямовані радіально до її осі, а других – вигнуті по гвинтовій лінії. Вісь вертушки в крильчастих лічильниках розміщена перпендикулярно до напрямку потоку, а в турбінних – паралельно йому.

Крильчасті лічильники призначені для встановлення в горизонтальних трубопроводах і застосовують під час вимірювання малих витрат води (до 10 м³/год). Турбінні лічильники можуть встановлювати в будь-якому положенні й використовують для вимірювання великих витрат води (до 150 м³/год).

На рисунку 10.11 наведена схема крильчастого лічильника води. У корпусі 1 із з'єднувальними штуцерами виконані два тангенціально спрямованих канали для входу й виходу води, що надходить на крильчатку 2. У верхній частині корпусу знаходиться стрілково-роликовий лічильний покажчик 3, відділений від крильчатки і редуктора 4 перегородкою із сальником 5 вихідної осі.

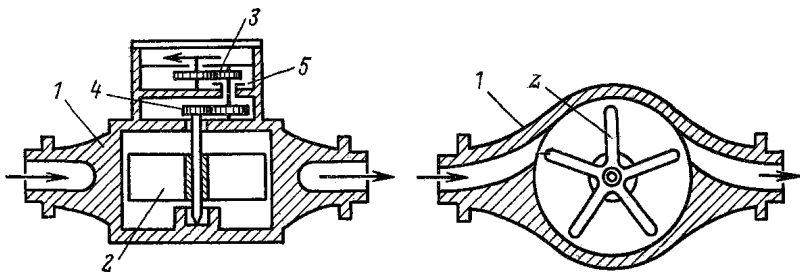


Рисунок 10.11 – Схема крильчастого лічильника води

Крильчасті лічильники мають лічильний пристрій із ціною поділки стрілкового показчика 0,001 і роликового – 0,1 м³. Кінцеве показання лічильного пристрою становить 1·10⁴ м³ води. Лічильники встановлюють у трубопроводі відповідно до нанесеної на корпусі стрілки, що показує напрямок потоку рідини.

Турбінні лічильники води мають лопатеві вертушки у вигляді багатоходового гвинта з великим кроком. Частота обертання цієї вертушки пропорційна швидкості потоку рідини і обернено пропорційна кроку лопаті. У цьому випадку рівняння (10.7) набуває вигляду:

$$Q_{об} = \frac{n \cdot F \cdot l}{K}, \quad (10.8)$$

де l – крок лопаті вертушки, м;
 K – сталий коефіцієнт.

Схема швидкісного лічильника з аксіальною турбіною показана на рисунку 10.12. У середині корпусу розміщена горизонтально уздовж напрямку вимірювального потоку рідини турбіна 6, виконана у вигляді багатовхідного гвинта. Перед турбіною установлений пристрій випрямлення потоку 1, призначений для згладжування потоку на вході і виключення завихрення. Обертання турбіни через черв'ячну пару 5 і передавальний механізм 2, розміщений у камері 4, передають

через сальник лічильному пристрою 3. Для регулювання швидкості обертання турбіни у процесі тарування лічильника передбачено регулювальний пристрій 7, що дозволяє повертати одну з радіальних перегородок пристрою випрямлення щодо напрямку потоку.

Турбінні лічильники використовують для вимірювання великих обсягів води і розраховані на номінальні витрати від 20 до 1250 м³/год.

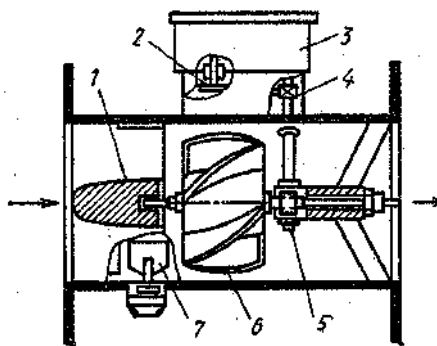


Рисунок 10.12 – Схема швидкісного лічильника з аксіальною турбіною

10.7.2 Анеометри

Для визначення швидкості потоку газу (повітря), особливо за малих її значень, коли через невеликий динамічний тиск вимірювання напірними трубками не забезпечує необхідної точності, набули застосування порівняно прості і чутливі прилади – анеометри, які придатні для вимірювання газових потоків, що перебувають під невеликим надлишковим тиском.

За допомогою анеометрів знаходять швидкість газу в точці розміщення приладу, а за значенням середньої швидкості потоку можна зробити висновок про витрату вимірювального середовища. Анеометри застосовують для визначення продуктивності повітродувних і повітровідвідних пристроїв, зокрема вентиляційних, а також набули поширення під час метеорологічних вимірювань. Класифікують анеометри за двома типами: механічні та електронні.

Механічний анеометр. Чутливим елементом анеометра є алюмінієва вертушка з декількома радіально розміщеними лопатями, вісь якої зв'язана механічно із лічильним пристроєм. У газовому потоці вертушка починає обертатися зі швидкістю,

пропорційною швидкості потоку, завдяки тиску цього газу на її лопаті.

Найчастіше застосовують крильчастий анемометр, придатний для вимірювання швидкості потоку в межах 0,1–10 м/с.

Цей прилад (рис. 10.13) являє собою металеве кільце 1, усередині якого на горизонтальній осі закріплена крильчатка 2 з лопатями, що розміщені на спицях під кутом 45° до площини, перпендикулярної до осі крильчатки. Під час вимірювання анемометр

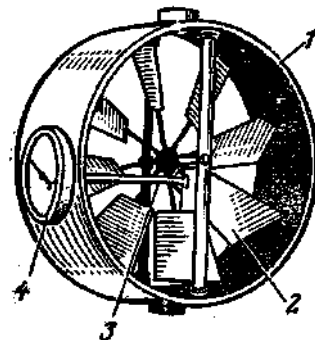


Рисунок 10.13 –
Крильчастий анемометр

розміщують так, щоб вісь крильчатки була паралельна напрямку потоку, що проходить через кільце. За допомогою черв'ячної пари та осі 3 обертання крильчатки передають лічильному пристрою 4, закріпленому на зовнішній бічній стороні кільця.

Анемометри непридатні для вимірювання швидкості різко пульсуючого потоку.

У показувальних анемометрах на осі вертушки закріплюють ротор мініатюрного генератора змінного струму. Залежно від частоти цього обертання генератор змінює вироблювану напругу, що вимірюють мілівольтметром, градуйованим у м/с.

10.8 Прилади для вимірювання об'єму речовини

Принцип дії приладів для вимірювання об'єму речовини ґрунтується на вимірюванні певного об'єму речовини, який проходить через прилад, і складанні результатів цього вимірювання. До таких пристроїв належать мірні баки та об'ємні лічильники.

10.8.1 Мірний бак

Мірний бак є найпростішим і точним вимірювальним пристроєм, що застосовують для визначення кількості рідини під

час повірки витратомірів і лічильників, а також під час випробувань відповідних установок.

Схема мірних баків показана на рисунку 10.14. Пристрій

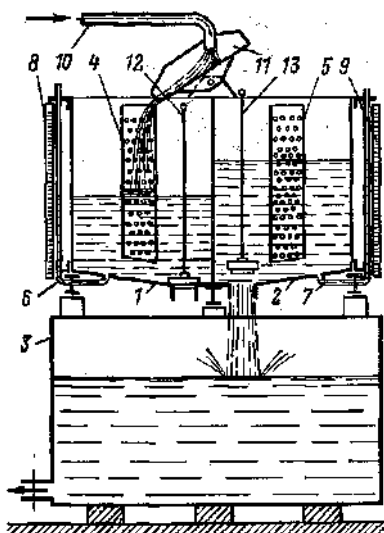


Рисунок 10.14 – Мірний бак

складається зі спарених мірних прямокутних баків 1 і 2 постійного за висотою перетину і збірного бака 3.

Усередині мірних баків знаходяться заспокоювачі 4 і 5 у вигляді патрубків із великою кількістю отворів у стінках. Обидва мірних баки забезпечені вказівними скляними трубками 6 і 7, поруч із якими встановлені циферблати 8 і 9 з міліметровими шкалами. Вимірювану рідину, що надходить по трубопроводу 10, направляють по черзі в кожен із мірних баків за допомогою перекидного пристрою 11. Для зливу рідини з мірних баків 1 та 2

у збірний бак 3 використовують зливальні патрубки із запірними клапанами 12 і 13. Кожен мірний бак попередньо градуують, тобто визначають залежність між висотою рівня рідини у вказівному склі і внутрішньому об'ємі бака.

10.8.2 Об'ємні лічильники

Вони мають мірні камери зі стінками, що переміщуються і витискують вимірювальний об'єм рідини, звільняючи камеру для наступної порції. До об'ємних лічильників зазначеного типу належать: однопоршневі, багатопоршневі, кільцеві, з овальними шестернями, ротаційні, сухі газові, мокрі газові та дискові.

Лічильники з овальними шестернями (рис. 10.16) застосовують для вимірювання кількості рідини в широкому діапазоні в'язкості (до $300 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Дія їх ґрунтується на витисненні певних обсягів рідини, які утворюються між стінками

вимірювальної камери 1 і овальними шестернями 2 і 3, під час обертання останніх під впливом руху вимірювальної рідини.

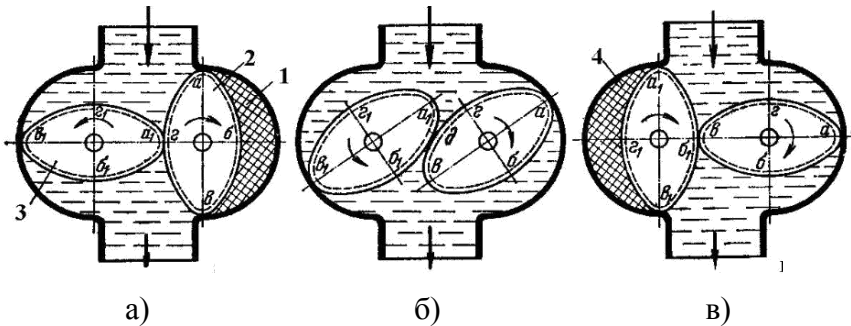


Рисунок 10.16 – Схема об'ємного рідинного лічильника з овальними шестернями

Овальні шестерні, що перебувають між собою в безперервному зчепленні, під час обертання обкатують одна одну. Залежно від положення шестерень кожна з них по черзі є ведучою і веденою.

У першому вихідному положенні (рис. 10.16 а) поверхня ag шестірни 2 розміщена під тиском рідини, що надходить, а рівна їй поверхня bg – під меншим за вхідний тиском рідини, що виходить. Ця різниця тисків створює обертальний момент, що обертає шестірню 2 за годинниковою стрілкою, причому рідина з порожнини 1 і порожнини, розміщена під шестірнею 3, витісняється у вихідний патрубок. Обертальний момент шестірни 3 дорівнює нулю, оскільки поверхні a_1g_1 і g_1b_1 однакові й містяться під однаковим вхідним тиском, а однакові поверхні a_1b_1 і b_1v_1 – під однаковим вихідним тиском. Отже, шестірня 2 є ведучою, а шестірня 3 – веденою.

У проміжному положенні (рис. 10.16 б) шестірня 2 обертається в попередньому напрямі, але її обертовий момент буде меншим, ніж у положенні а, через протидію моменту, створеного тиском на поверхню dg (d – точка контакту шестерень). Поверхня da_1v_1 шестірни 3 розміщена під тиском рідини, що входить, а поверхня v_1b_1d – під тиском рідини, що виходить. Шестірня відчуває крутний момент, спрямований

проти годинникової стрілки. У цьому положенні обидві шестерні – ведучі.

У другому вихідному положенні (рис. 10.16 в) шестірня 3 перебуває під дією найбільшого обертового моменту і є тією, що веде, в той час як обертовий момент шестірні 2 дорівнює нулю, вона є веденою.

Однак сумарний обертальний момент обох шестерень для будь-якого положення залишається незмінним.

За час повного обертання шестерень (один цикл роботи лічильника) порожнини 1 і 4 два рази заповнюються і два рази випорожняються. Обсяг чотирьох доз рідини, витісненої з цих порожнин, становить вимірювальний об'єм лічильника. Вісь однієї із шестерень обертає рахунковий механізм, розміщений поза корпусом приладу.

Лічильники з овальними шестернями можна застосовувати для вимірювання кількості майже всіх рідин, зокрема й в'язких, номінальні витрати становлять від 1,7 до 60 м³/год.

Ротаційні лічильники газу в основному застосовують для вимірювання кількості горючих газів, принцип дії яких той самий, що і лічильників рідини з овальними шестернями. Ротаційний лічильник (рис. 10.17) містить вимірювальну камеру 1, в якій розміщені широкі обертові лопаті 2 і 3 у формі вісімки, які рухаються завдяки різниці тисків газу, що проходить через лічильник. Прилад має лічильний пристрій із роликів показчиком, з'єднаний з однією з лопатей за допомогою магнітної муфти або за допомогою вихідної осі, пропущеної крізь сальник. Прилади розраховані на робочий тиск газу 0,1 МПа і температуру 0–50 °С. Основна похибка лічильників становить $\pm(1-1,5) \%$.

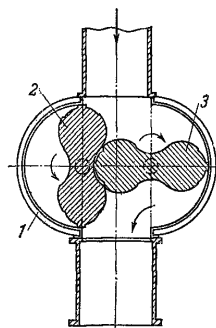


Рисунок 10.17 – Схема ротаційного лічильника

Крім розглянутих лічильників для вимірювання кількості рідини широко застосовують об'ємні лічильники з циліндричним поршнем, принцип дії яких заснований на витісненні з

вимірювальної камери (циліндра) визначених обсягів рідини циліндричним поршнем, який переміщається за рахунок різниці тисків вимірюваної рідини до лічильника та після нього.

Для вимірювання кількості рідин застосовують як швидкісні, так і об'ємні лічильники, а для вимірювання кількості газу – лише об'ємні лічильники.

10.9 Ваговий метод вимірювання витрати сипучих речовин

Найбільш точним способом вимірювання кількості твердих і сипучих тіл є зважування.

Ваговий метод вимірювання масової витрати сипучої речовини полягає в періодичному або безперервному вимірюванні сили ваги, створюваної вагою окремих порцій або ділянок потоку сипучої речовини.

Витратоміри, що реалізують цей принцип вимірювання, є автоматичними вагами. Останні поділяють на дві великі групи: ковшові й конвеєрні. Перші є витратомірами періодичної дії. Вони вимірюють вагу послідовних порцій маси сипучої речовини. Другі – безперервної дії. Вони вимірюють вагу маси сипучої речовини, що перебуває на тій ділянці рухомого конвеєра, яка проходить у цей момент над пристроєм для вимірювання ваги.

10.9.1 Автоматичні порційні ваги

Порціонні ваги автоматично відсікають певні порції зважуваного матеріалу, що надходить із живильного бункера, а після зважування викидають зважену порцію в приймальний бункер. Лічильник ваг підсумовує масу матеріалу, що пройшла через ваги.

Автоматичні порційні ваги для твердих сипучих матеріалів зазвичай виконують із перекидним ковшем або із дном ковша, що відчиняється. Основними перевагами цих ваг є порівняльна простота конструкції, висока точність зважування, робота ваг без спеціального привода.

Ваги для безперервного зважування характерні тим, що конструктивно вони нерозривно пов'язані з системою транспортування матеріалу (конвеєрні ваги, автоматичні вагові дозатори і тощо).

На рисунку 10.18 показана принципова схема автоматичних ваг із перекидним ковшем.

До одного кінця рівноплечого подвійного коромисла 1 на підвісці 3 прикріплений ківш 4, а до іншого – гиретримач 5 з гирями. За порожнього ковша центр тяжіння завдяки протизвазі 6 на задній стінці ковша знаходиться з правого боку точки підвісу; ківш намагається повернутися навколо точки підвісу за годинниковою стрілкою, чому перешкоджає упор 7. Під час заповнення ковша зважуванням продуктом ліва сторона, що має більший об'єм, стає важчою ніж права. Внаслідок цього порожній ківш завжди повертається за годинниковою стрілкою, а заповнений – проти годинникової стрілки. У наповненого ковша центр тяжіння зміщується вліво від точки підвісу. Від передчасного перекидання проти годинникової стрілки ківш утримує клямка 9, накинута на призму 8, забиту ззовні в бічну стінку ковша. Клямка 9 шарнірно укріплена на підвісці 3.

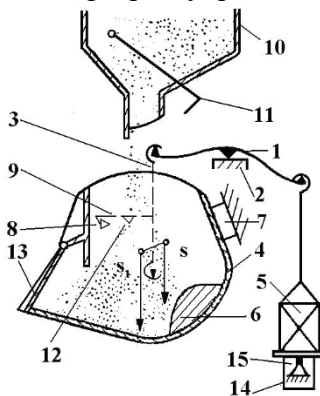


Рисунок 10.18 – Схема ваг із перекидним ковшем:

- 1 – коромисло; 2 – станина; 3 – підвіска; 4 – ківш; 5 – гиретримач; 6 – протизвага; 7 – упор; 8 – призма; 9 – клямка; 10 – живильна воронка; 11 – заслінка; 12 – нерухомий упор; 13 – дверцята; 14 – скоба; 15 – нерухомий упор

Ківш наповнюють через живильну воронку 10, вихідний отвір якої закриває заслінка 11. Під час заповнення продуктом ківш повільно опускається вниз, а гиретримач 5 піднімається вгору. Після досягнення рівноваги гиретримач впливає на механізм управління заслінкою 11, внаслідок цього остання падає і закриває нижній отвір воронки 10.

Після припинення надходження зважуваного матеріалу наповнений ківш по інерції продовжує рух вниз доти, поки скоба 14 гиретримача 5 не зустріне упору 15. Під час опускання ковша клямка 9 зстикається з нерухомим упором 12, закладеним у станину ваг, і, піднімаючись, звільняє призму 8. Звільнений від запору ківш повертається проти годинникової стрілки; дверцята 13 під дією власної ваги і тиску матеріалу, що розміщені в ковші, відкриваються, і вміст ковша висипається.

Як тільки ківш повністю спустошиться, внаслідок переміщення центру ваги вправо, він повернеться за годинниковою стрілкою, відкривши при цьому заслінку 11. Одночасно з цим призма 8, піднімаючись разом із ковшем, потрапляє під зуб клямки 9.

Далі процес повторюється знову. Кількість перекидань ковша враховують лічильником на станині ваг. Циферблат лічильника безпосередньо вказує вагу продукту, що пройшов через ваги з початку їх роботи. Кількість перекидань ковша в автоматичних вагах зазвичай невелика – від 2 перекидань до 3 перекидань за 1 хвилину. Ємність ковша коливається в досить широких межах від 5 кг до 20 т залежно від продуктивності ваг. Основна допустима похибка становить від $\pm 0,5\%$ до $\pm 1\%$.

Ударні навантаження працюючих ваг з перекидним ковшем змушують вдаватися до масивних фундаментів.

На рисунку 10.19 показана принципова схема *автоматичних ковшових ваг з дном, що відкривається*. Ці ваги також побудовані за принципом рівноплечих ваг.

Ваги із дном, що відкривається, відрізняють від ваг з перекидним ковшем (див. рис. 10.18) будовою ковша 1, який має відкидне дно 2 з противагою 3, яка закриває дно під час спорожнення ковша. Над ковшем нерухомо закріплена воронка

11, нижній отвір якої закриває заслінка 12. Ліворуч на дні 2 ковша знаходиться гачок 4, який своїм виступом, заходить за виступ клямки 5 й утримує дно під час заповнення ковша.

Під час наповнення ковша зважуваним продуктом заслінка 12 відкрита і утримується в цьому положенні. Продукт з воронки 11 надходить у ківш 1 ваг і змушує останні поступово опускатися. Коли ківш 1 прийде в рівновагу з гиретримачем 10, заслінка 12 падає і припиняє наповнення ковша. За інерцією ківш продовжує опускатися; водночас клямка 5 зстикається з нерухомим упором 6, що знаходиться на станині ваг, і обертається проти годинникової стрілки, звільняючи гачок, а разом з ним і дно ковша. Після цього дно ковша відкривається і продукт висипається з ковша. Коли весь продукт висипався з ковша, противага 3 закриває дно ковша і гачок 4 знову входить у зчеплення з клямкою 5.

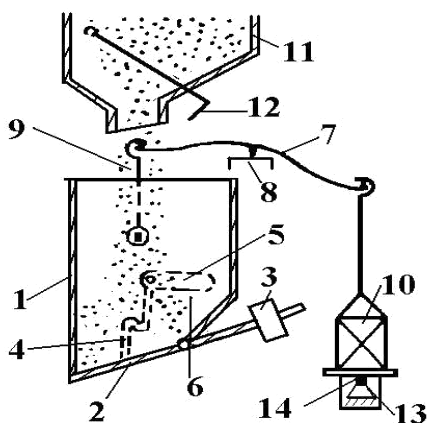


Рисунок 10.19 – Автоматичні порційні ваги із дном, що відкривається:

- 1 – ківш; 2 – відкідне дно; 3 – противага; 4 – гачок;
- 5 – клямка; 6 – нерухомий упор; 7 – коромисло;
- 8 – станина; 9 – підвіска; 10 – гиретримач;
- 11 – живильна воронка; 12 – заслінка; 13 – скоба;
- 14 – нерухомий упор

Водночас порожній ківш піднімається і відкриває заслінку 12. Починається нове наповнення ковша.

Ваги із дном ковша, що відкривається, працюють значно спокійніше (в частині ударних навантажень) за ваги з перекидним ковшем.

10.9.2 Автоматичні конвеєрні ваги

Такі ваги реєструють сумарну масу сипучого матеріалу, перенесеного транспортером, і показують миттєву продуктивність. Принципова схема автоматичних конвеєрних ваг показана на рисунку 10.20.

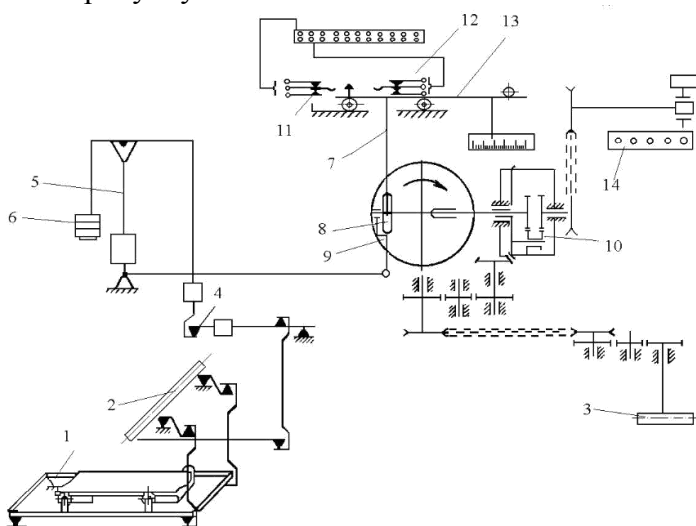


Рисунок 10.20 – Принципова схема автоматичних конвеєрних ваг:

- 1 – вантажно-приймальна платформа; 2 – важіль;
- 3 – приводний ролик; 4 – важіль; 5 – квадрант;
- 6 – вантажі; 7 – повідок; 8 – ролик каретки інтегратора;
- 9 – диск інтегратора; 10 – зубчастий диференціал;
- 11 – кінцевий перемикач; 12 – подорожній перемикач;
- 13 – каретка; 14 – лічильник

Ваги вбудовують у стаціонарний стрічковий транспортер. Платформа ваг несе на собі дві вагові роликові опори і є ділянкою транспортера.

Ваги працюють таким чином. Матеріал, що розміщений на стрічці конвеєра, впливає на дві вагові роликові опори, закріплені на вантажно-приймальній платформі 1. Через важелі 2 і 4 це зусилля передають на вантажопідйомне плече квадранта 5, який за допомогою повідка 7 шарнірно з'єднаний з роликом 8 каретки інтегратора. Ролик утворює фрикційну пару з диском 9. Диск інтегратора обертає приводний ролик 3 через відповідну передачу. Приводний ролик притискується до холостої гілки стрічки конвеєра, яка і надає йому обертання. Отже, кутова швидкість диска 9 інтегратора завжди відповідає лінійній швидкості стрічки конвеєра. Кожне відхилення квадранта внаслідок збільшення навантаження на платформу 1 викликає поворот ролика 8 у площині креслення, що призводить до появи деякого кута між коловими швидкостями диска 9 і ролика 8. Водночас з'являється сила, яка намагається перемістити ролик 8 далі від центру диска 9. Це переміщення можливе лише разом з кареткою 13, що котиться по нерухомій рейці. Переміщення відбуватиметься до суміщення напрямків кутових швидкостей ролика і диска в новому положенні, тобто на іншій відстані від центру диска.

Відхилення квадранта 5 під час зменшення корисного навантаження викличе зворотний процес. Отже, кожному положенню квадранта 5, який визначає величину погонного навантаження на стрічці, відповідає певна відстань фрикційної точки ролика 8 від центру диска 9; тоді кутова швидкість ролика пропорційна шуканій масі матеріалу. Кутові швидкості диска 9 і ролика 8 підсумовують зубчастим диференціалом 10. Результуюча швидкість веденого вала диференціала обумовлює обертання першого диска лічильника 14, що показує масу перенесеного транспортером матеріалу. Тарування ваг проводять виміром маси накладних вантажів 6.

Ваги забезпечені показником продуктивності конвеєра, що показує положення каретки 13 щодо нерухомої рейки, а отже, і величину продуктивності в кожен момент часу за незмінної швидкості конвеєра. Крім того, ваги забезпечують електричним сигнальним пристроєм, що фіксує перевантаження і недовантаження стрічки конвеєра під час його роботи.

Сигнальний пристрій складається з кінцевого 11 і подорожнього 12 перемикачів, що спрацьовують під час пересування каретки 13 по нерухомій рейці. Кінцевий перемикач вмикає сигнальний пристрій під час досягнення найбільшого допустимого погонного навантаження на стрічці конвеєра. Подорожній перемикач вмикає сигнальний пристрій під час роботи ваг з погонними навантаженнями нижче допустимих.

Перевантаження стрічки (межі вище максимального погонного навантаження) лічильник не враховує. Ваги можуть виготовляти з вторинними приладами, що забезпечують дистанційну передачу показань ваг.

В автоматичних конвеєрних вагах неперервного зважування відбувається підсумовування матеріалу, що був перенесений транспортною стрічкою ваг.

Допустима похибка ваг становить $\pm 1\%$. Швидкість стрічки транспортера досягає 2,5 м/с; ширина стрічки транспортера розміщується в межах від 400 мм до 2 000 мм; погонні навантаження на стрічку транспортера становлять 6–500 кг/м.

10.10 Дозування твердих і рідких матеріалів

У ряді технологічних процесів дозування є однією з основних операцій. Якість готової продукції та раціональне витрачання вихідних матеріалів багато в чому залежать від дозування.

Дозування сипучих і рідких матеріалів – це визначення заданої дози матеріалу (за масою або об'ємом). Застосовувані для цієї мети прилади й пристрої називають *дозаторами*.

Сипучі та рідкі матеріали дозують об'ємним і ваговим методами. За ступенем автоматизації процеси дозування можуть бути ручними, напіваавтоматичними та автоматичними.

Дуже важливим моментом в успішній роботі дозаторів є забезпечення надходження до них дозувального матеріалу рівномірним потоком. Механізми, що застосовують у дозаторах для передавання матеріалу, можна поділити на дві основні групи. До першої групи належать різного типу збуджувачі, що встановлюють безпосередньо у впускних воронках дозаторів і

застосовують для розпушування матеріалу, запобігання утворенню склепінь (мішалки, вібратори). До другої групи можна віднести спеціальні живильні механізми, що подають матеріали з бункерів та інших сховищ до дозатора (транспортні, лоткові, барабанні, шнекові, тарілчасті, вібраційні).

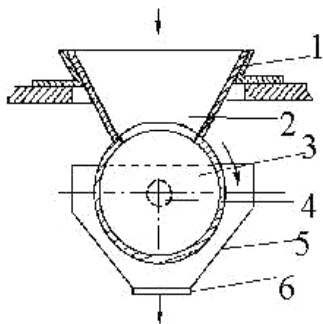


Рисунок 10.21 –
Механічний об'ємний
дозатор:

- 1 – впускна воронка;
- 2 – отвір воронки;
- 3 – циліндр;
- 4 – вісь;
- 5 – приймальний бункер;
- 6 – випускний отвір
приймального бункера

Механічний об'ємний дозатор для сипучих матеріалів (рис. 10.21) працює в такий спосіб. Порожній циліндр 3 обертається на осі 4. У стінці циліндра є отвір 2, через який дозувальний матеріал самотією надходить у циліндр з впускної воронки 1. Під час повороту циліндра на 180° матеріал з нього висипається в приймальний бункер 5, звідки через випускний отвір 6 надходить за призначенням.

На рисунку 10.22 показаний циферблатний показчик із фотоприставкою, який використовують для напівавтоматичного вагового

дозування сипучих матеріалів. Наявну на вагах шкалу 1 використовують для встановлення дози переміщенням гирь за шкалою. Водночас стрілка 2 ваг показує на циферблаті задану вагу. На шкалі дозатора на нульовій позначці встановлений світлоелемент, промінь від якого сприймає фотореле 4. Під час надходження дозувального матеріалу на ваги стрілка поступово підходить до нульової поділки, повертаючись проти годинникової стрілки. Під час збігання стрілки з нулем наявний на осі стрілки прапорець 3 перетне світловий промінь і викличе спрацювання фотореле 4, яке пов'язане з пристроями відсікання подачі матеріалу і вивантаження його за призначенням.

Такий циферблатний показчик може бути використаний для роботи в комплекті з сельсин-датчиком. Для цього стрілку ваг 2 кінематично зв'язують із ротором сельсин-датчика, який буде видавати електричний сигнал, пропорційний масі матеріалу.

У багатьох випадках за вузли установок, що дозують рідини, широко застосовують насоси. Причому вони можуть бути і джерелами напору, і самостійними дозувальними агрегатами.

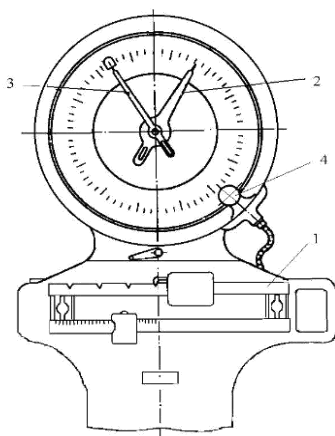


Рисунок 10.22 –
Циферблатний показчик
із фотоприставкою:

- 1 – шкала ваг;
- 2 – стрілка;
- 3 – прапорець;
- 4 – фотореле

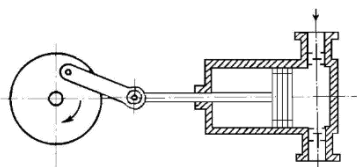


Рисунок 10.23 – Насос-
дозатор зі зворотно-
поступальним рухом
поршня

Насоси-дозатори зі зворотно-поступальним рухом поршня (рис. 10.23) використовують для дозування різних рідин, зокрема хімічно активних і в'язких. На їх входних і вихідних патрубках встановлені клапани. Коли привід переміщує поршень справа наліво, циліндр наповнюється через вхідний клапан (клапан на виході закривається), а коли поршень, дійшовши до крайнього положення, почне переміщатися зліва направо, клапан на вході закриється, клапан на виході відкриється і рідина витісниться в приймальний пристрій.

У технологічних процесах найчастіше застосовують *автоматичні стрічкові вагові дозатори безперервної дії* продуктивністю від декількох кілограмів до кількох тисяч кілограмів сипучого матеріалу за 1 годину. Вони транспортують сипучий матеріал, неперервно зважують і регулюють його подачу.

За способом регулювання подачі матеріалу вагові стрічкові дозатори можуть бути поділені на дві основні групи:

1) з механічним (кінематичним) зв'язком регульовального органу, що змінює подачу матеріалу на стрічку дозатора; у цих дозаторах роль регулятора виконує ваговий чутливий елемент (дозатори з регулятором прямої дії);

2) з електричним або пневматичним зв'язком зі стороннім джерелом енергії, що забезпечує автоматичну зміну подачі матеріалу живильника відповідно до заданої продуктивності (дозатори з регулятором непрямої дії).

На рисунку 10.24 наведені принципові схеми найбільш типових *автоматичних вагових дозаторів із механічним регулюванням подачі матеріалу*. У цих автоматичних вагових дозаторах транспортер є частиною коромисла ваг; матеріал, що розміщується на транспортері, врівноважує вантаж. У вагових дозаторів, наведених на рисунку 10.24 а, на рамі встановлений стрічковий транспортер 1. Обертання ведучого барабана транспортера здійснюють через редуктор від електродвигуна, встановленого на пересувній плиті. Маса матеріалу, що розміщена на транспортерній стрічці, врівноважує вантаж 2, який можна переміщати.

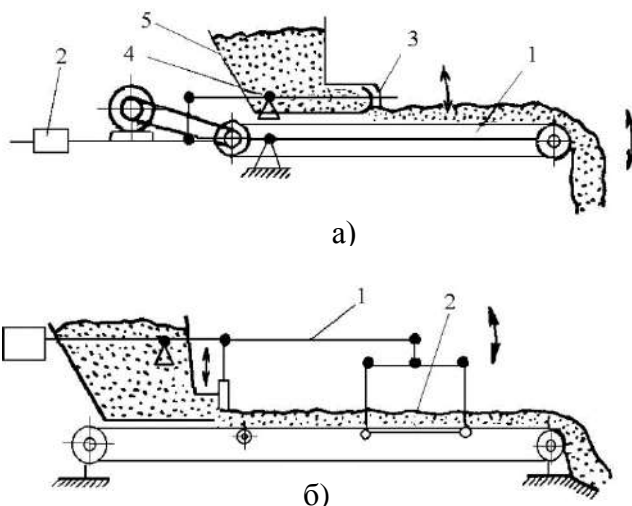


Рисунок 10.24 – Принципові схеми автоматичних вагових дозаторів із механічним регулюванням подачі матеріалу

Призначений для зважування матеріал надходить із бункера у воронку 5, а звідти – безпосередньо на стрічку транспортера 1. Під стрічкою транспортера встановлені кілька опорних роликів для зменшення тиску на ролики транспортера матеріалу, що розміщений у бункері.

На рухому стрічку 1 з воронки 5 подають матеріал, товщина шару якого залежить від положення затвора 3. Під час зміни маси матеріалу, що надходить на транспортер, останній нахиляється вниз або вгору. Затвор 3, що розміщений на важелі, шарнірно пов'язаний із коромислом ваг. Коромисло рухається навколо осі обертання 4, не пов'язаної з транспортером. Затвор 3 збільшує або зменшує перетин випускного перерізу воронки 5 у такий спосіб: під час збільшення ваги матеріалу на стрічці транспортера останній нахиляється вниз, підіймаючи вгору вантаж 2 разом із лівим плечем коромисла. Це спричиняє опускання вниз затвору 3 та зменшення перетину випускного перерізу воронки 5. Внаслідок цього маса матеріалу на стрічці зменшиться і транспортер підніметься вгору. Водночас затвор 3 також

підніметься вгору, збільшуючи вихідний переріз воронки 5. Кількість матеріалу, пропущеного ваговим дозатором, визначає лічильник, який показує кількість погонних метрів, пройдених стрічкою.

На рисунку 10.24 б наведена принципова схема вагового дозатора неперервної дії іншої конструкції. У цьому дозаторі платформа ваг укріплена шарнірно на рамі. Під час роботи, коли на контрольній ділянці 2 транспортера виявиться надлишок матеріалу, правий кінець коромисла 1 опуститься, закріплена на ньому заслінка прикриє отвір воронки живильника, подача матеріалу буде зменшена до настання рівноваги. Конструкція цих вагових дозаторів дещо простіша, ніж попередніх, але водночас налаштування їх грубіше і точність зважування нижча.

В вагових дозаторах із механічним регулюванням подачі матеріалу швидкість транспортерної стрічки коливається від 0,02 м/с до 0,6 м/с, що впливає на продуктивність дозатора. Точність таких дозаторів за дрібнозернистих сипких матеріалів досягає $\pm 1\%$, точність збільшується під час зменшення швидкості і збільшення навантажень на транспортну стрічку.

Недоліками вагових дозаторів із механічними живильниками є їх значна інерційність і повільна робота елементів системи механічного регулювання подачі матеріалу. Ці недоліки усунуті у вагових дозаторах з електричними живильниками, що мають незначну інерційність і більшу швидкість роботи схеми регулювання подачі матеріалу.

Найбільшого поширення набули стрічкові дозатори з електромагнітними живильниками. Принципова схема такого дозатора показана на рисунку 10.25.

Ваговий дозатор складається зі стрічкового транспортера 1, що гойдається на опорі 2. Транспортер призводить у рух електродвигун 3 через редуктор, розміщений на правому кінці транспортера.

Лівий кінець транспортера з'єднаний із важелем 4 вагового механізму, а через нього – з коромислом 5 ваг. Сипучий матеріал подають на транспортер електровібраційним живильником 6. Вагу матеріалу на транспортері врівноважують пересувним вантажем 7.

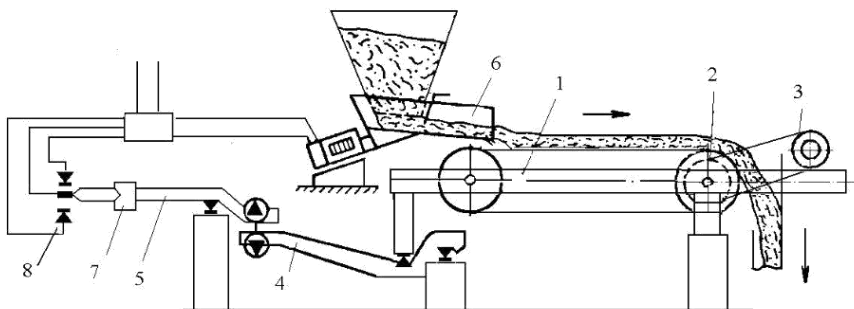


Рисунок 10.25 – Принципова схема стрічкового дозатора з електромагнітним живильником

Коромисло має спеціальний контактний пристрій 8, з'єднаний з електровібраційним живильником 6. Матеріал зі стрічки транспортера зсипається безперервним потоком у прийомну лійку.

Під час зменшення маси матеріалу на стрічці транспортера кінець його підніметься, нижній контакт контактного пристрою замкнеться, частота коливань вібратора зросте, і подача матеріалу на стрічку транспортера буде збільшуватися доти, поки не відновиться рівновага. Під час надходження надлишку матеріалу на транспортер його кінець опустеться, а вібратор зменшить подачу матеріалу.

Вібратор робить до 50 коливань за 1 секунду з амплітудою до 1 мм. Зміну амплітуди коливань досягають зміною напруги струму, що проходить у котушці електромагнітів.

На рисунку 10.26 наведена принципова схема автоматичного стрічкового вагового дозатора з пневматичним вібраційним живильником і пневматичним регулятором. Ці вагові дозатори застосовують там, де не допускають застосування електромагнітних вібраторів.

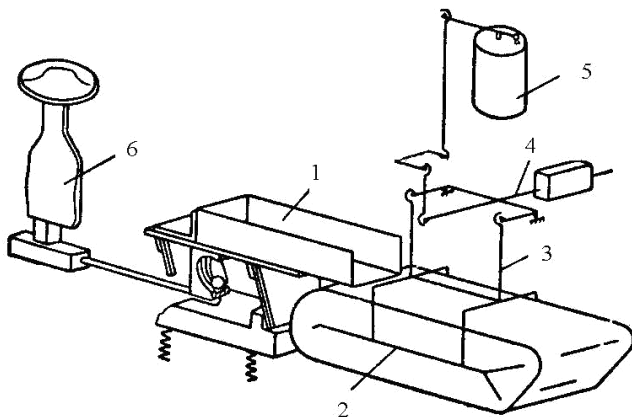


Рисунок 10.26 – Принципова схема автоматичного стрічкового вагового дозатора з пневматичним вібраційним живильником і пневматичним регулятором

Автоматичне керування процесом дозування здійснюють пневматичною системою регулювання. Подача матеріалу відбувається пневматичним лотковим вібраційним живильником 1. Вібрацію живильника здійснюють пневматичним вібродвигуном інерційного типу з неврівноваженою масою, принцип дії якого полягає в обертальному русі металевої кульки по кільцевій доріжці обойми в корпусі вібродвигуна під впливом повітря, що надходить у двигун під тиском та створює коливальний рух лотка живильника. Величина тиску повітря істотним чином впливає на частоту та інтенсивність коливань.

Так, за тиску повітря до $1,5 \text{ кгс/см}^2$ частота коливань становить 100–150 Гц, а при тиску 10 кгс/см^2 – 600–800 Гц. Отже, продуктивність живильника може змінюватися в широких межах під час зміни тиску повітря, що підводять до віброживильника.

Матеріал із живильника надходить на вантажно-приймальній ваговій транспортер 2, що рухається з постійною швидкістю. Транспортер через підвіски 3 пов'язаний із ваговимірним механізмом 4.

Будь-яку змінну вагового навантаження на вантажно-приймальному транспортері перетворюють за допомогою силівимірювального датчика 5 на пропорційний пневматичний сигнал, що надходить у систему автоматичного регулювання. Остання впливає на мембранний виконавчий механізм пневматичного регулювання клапана 6 і тому змінює тиск в лінії пневматичного вібраційного живильника. Водночас регульований параметр підтримують на заданому рівні.

Похибка автоматичних вагових дозаторів становить $\pm 0,5\%$.

Застосування електронних і пневматичних приладів у вагових дозаторах з електромагнітним і пневматичним віброживильниками дозволяє використовувати ваги як датчики в системах комплексної автоматизації різноманітних неперервних технологічних процесів.

11 МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ СКЛАДУ МАТЕРІАЛІВ

Одним з важливих технологічних параметрів більшості виробництв (особливо підприємств хімічної, нафтохімічної, нафтоперероблювальної, металургійної та харчової промисловостей тощо) є склад переробних матеріалів і готової продукції, тому аналітичний контроль є обов'язковим елементом багатьох систем керування виробництвом.

Завдання аналізу складу матеріалів поділяють на дві групи:

- 1) визначення вмісту одного компонента в аналізованій речовині;
- 2) визначення вмісту двох і більше компонентів у аналізованій речовині.

Автоматичні прилади, призначені для визначення вмісту одного компонента, називають *автоматичними концентратомірами*, а прилади, що призначені для визначення вмісту двох і більше компонентів – *автоматичними аналізаторами складу*.

Прямі методи вимірювання концентрації, відомі під назвою *методів об'ємного аналізу*, набули поширення в лабораторній аналітичній практиці. Деякі з цих методів – титрування і метод хімічного поглинання – застосовують в автоматичних концентратомірах.

У виробничій практиці часто використовують так звані *непрямі методи* вимірювання концентрації. Вони засновані на використанні однозначної функціональної залежності між будь-яким непрямим фізичним параметром аналізованої речовини і складом цієї речовини. За непрямі параметри можуть бути взяті такі: густина, питома електропровідність, показник заломлення, теплопровідність та інші фізичні параметри аналізованої речовини, що залежить від його складу.

Завдання автоматичного аналізу складу, тобто одночасного вимірювання вмісту двох або більше компонентів у аналізованій речовині, набагато складніші за завдання вимірювання концентрації. Для цих цілей використовують, в основному,

непрямі методи аналізу в поєднанні з поділом аналізованої суміші на компоненти (хроматографія і мас-спектрометрія).

Для вимірювання концентрації речовини найбільш поширені такі непрямі методи:

- а) електрокондуктометричний;
- б) потенціометричний;
- в) абсорбційний спектральний;
- г) рефрактометричний;
- д) термокондуктометричний;
- е) термохімічний;
- ж) термомагнітний;
- и) за температурної депресії;
- к) відповідно до тиску насичених парів.

Для визначення вмісту двох і більше компонентів у аналізованій речовині найчастіше використовують хроматографічний метод.

11.1 Електрокондуктометричний метод аналізу

Електрокондуктометричний метод аналізу застосовують для вимірювання концентрації розчинів електролітів за величиною їх питомої електропровідності. Як відомо, провідність розчинів електролітів зумовлена наявністю в них заряджених частинок – іонів, що утворюються внаслідок дисоціації частини молекул електроліту під час його розчинення. Властивість розчину проводити електричний струм кількісно характеризують величиною питомої електропровідності σ , яка залежить від природи електроліту α і його концентрації C так:

$$\sigma = \alpha \cdot C \cdot F \cdot (v_k + v_a), \quad (11.1)$$

де α – ступінь електролітичної дисоціації електроліту;

C – концентрація електроліту;

v_k, v_a – електричні рухливості катіонів і аніонів (швидкості руху під час напруженості електричного поля 1 В/см);

F – число Фарадея ($F = 96\,500$ Кл/моль).

Ступінь електролітичної дисоціації залежить від природи електроліту й розчинника.

Електрокондуктометричний метод аналізу належить до числа невибірових і придатний, в основному, для вимірювання концентрації двокомпонентних розчинів. Крім того, його можна застосовувати в тому разі, коли питома електропровідність визначеного компонента набагато більша, ніж у не визначених компонентів, і коли концентрація останніх у процесі вимірювань практично не змінюється.

Концентрацію технологічних розчинів за величиною їх питомої електропровідності вимірюють за допомогою автоматичних електрокондуктометричних концентратомірів таких основних типів:

- 1) контактних із двохелектродною вимірювальною коміркою;
- 2) контактних із чотириелектродною вимірювальною коміркою;
- 3) безконтактних низькочастотних;
- 4) безконтактних високочастотних.

Найпоширеніші *електрокондуктометричні концентратоміри з двохелектродною вимірювальною коміркою*. Визначення питомої електропровідності σ за допомогою такої комірки відбувається завдяки вимірюванню опору R_x стовпця розчину, що розміщується між електродами. Вимірювальну комірку живлять змінною напругою, щоб уникнути забруднення електродів продуктами електролізу.

Зменшення поляризації електродів досягають зниженням густини струму на їх поверхні, тому електроди виготовляють із матеріалів із розвиненою поверхнею (губчаста платина, графіт). Для компенсації температурної похибки вимірювання концентрації під час використання двохелектродних комірок зазвичай застосовують металеві термометри опору, ввімкнені послідовно з коміркою (рис. 11.1).

Принцип компенсації заснований на тому, що під час збільшення температури контрольованого розчину опір вимірювальної комірки R_x зменшується (питома електропровідність σ розчину зростає), а опір металевого

термометра R_t зростає. Температурна компенсація відбувається в тому разі, коли збільшення цих опорів за однієї і й тієї самої зміни температури однакові.

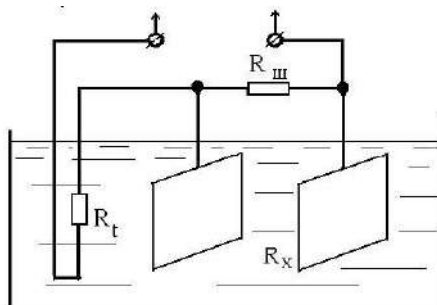


Рисунок 11.1 – Схема під'єднання компенсаційного термометра опору до двохелектродної вимірювальної комірки

Для узгодження температурних коефіцієнтів опору розчину і металу, які відрізняються майже на порядок, паралельно опору комірки R_x під'єднують шунтуючий опір з манганіну $R_{ш}$, величина якого практично не залежить від температури.

Вимірювання опору комірки R_x здійснюють в більшості випадків за допомогою врівноважених мостових схем, три плеча яких утворені постійними опорами R_1 , R_2 і R_3 , виготовленими з манганіну, а в четверте плече під'єднана комірка R_x (рис. 11.2).

Під час зміни концентрації контрольованого розчину змінюється величина опору комірки R_x рівновага моста порушується і в його діагоналі cd з'являється напруга U_{cd} . Цю напругу підсилюють електронним підсилювачем ЕП, який виконує функції індикатора розбалансу моста, і подають на реверсивний двигун РД. Останній через систему передач змінює положення движка реохорда R_p доти, поки міст знову не повернеться в стан рівноваги. Положення движка реохорда і пов'язаної з ним стрілки приладу відповідає новому значенню концентрації контрольованого розчину.

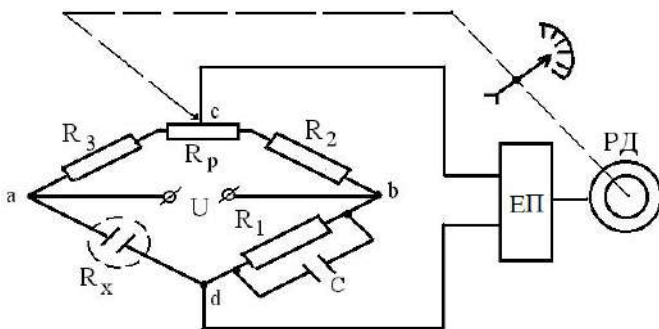


Рисунок 11.2 – Врівноважена мостова вимірювальна схема електрокондуктометричного концентратоміра з двохелектродною вимірювальною коміркою

Розчин у вимірювальній комірці має не лише активний опір, а і деяку ємність, яка залежить від його діелектричної проникності. Для компенсації ємнісного опору вимірювальної комірки, який у процесі вимірювань залишається практично не змінним, застосовують конденсатор C . Його під'єднують у мостову схему, в плече, суміжне до вимірювальної комірки R_x .

Електрокондуктометричні концентратоміри з двохелектродною вимірювальною коміркою мають відносно низьку точність. Основне джерело їх похибок – поляризація електродів, через які в процесі вимірювання проходить струм.

Цього недоліку позбавлені *електрокондуктометричні концентратоміри з чотириелектродною вимірювальною коміркою* (рис. 11.3). Під час використання таких комірок струм у розчині проходить між двома зовнішніми електродами 1 і 4, під'єднаними до джерела напруги U . Завдяки використанню великого обмежуючого опору R_i сила струму в ланцюзі комірки залишається незмінною незалежно від зміни опору розчину R ($R_i \gg R$). Два внутрішніх електроди 2 і 3 виконують функції потенціометричних, за їх допомогою вимірюють падіння напруги в розчині. Отже, різниця потенціалів між електродами 2 і 3 однозначно визначають концентрацію контрольованого розчину.

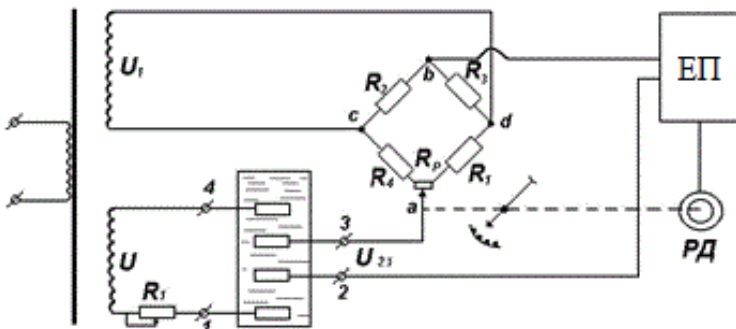


Рисунок 11.3 – Електрокондуктометричний концентратомір з чотириелектродною вимірювальною коміркою:

1, 4 – зовнішні електроди;

2, 3 – внутрішні (потенціометричні) електроди

Внаслідок такого контакту електроди піддаються корозії і виникають похибки вимірювань. Тому в останні роки значну увагу приділяють розвитку безконтактних методів вимірювання електропровідності розчинів.

Безконтактний метод вимірювання електропровідності з використанням напруги промислової частоти називають методом *низькочастотної безконтактної електрокондуктометрії*. Цей метод заснований на індукуванні ЕРС у замкненому витку електропровідної рідини (рідинний виток), який є вторинною обмоткою трансформатора Tr_1 (рис. 11.4).

Величина ЕРС $E_{\text{вим}}$, що наводиться у вторинній обмотці вимірювального трансформатора Tr_2 , пропорційна концентрації. У більшості випадків для вимірювання $E_{\text{вим}}$ застосовують компенсаційний метод, для цього використовують додаткову обмотку W_k трансформатора Tr_2 , ампер-витки якої віднімають з ампер-витків розчину.

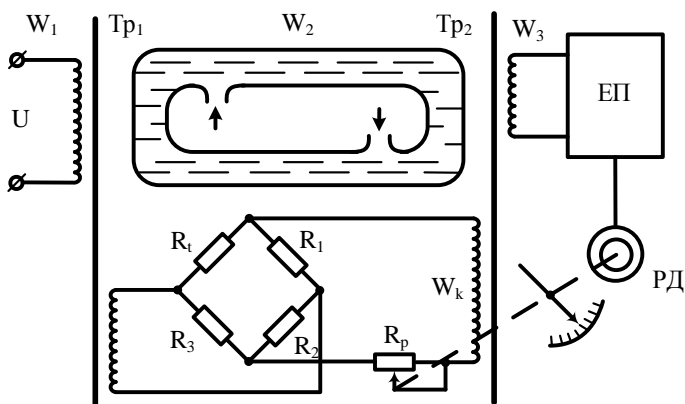
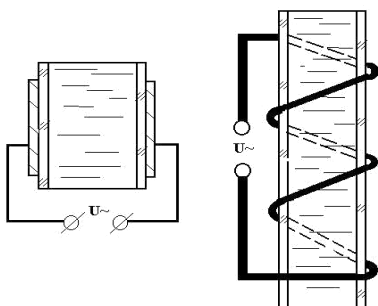


Рисунок 11.4 – Принципова схема низькочастотного безконтактного електрокондуктометричного концентрометра

Зміну сили струму, що проходить через компенсаційну обмотку W_k , здійснюють реверсивним двигуном РД, який переміщує движок реохорда R_p . Положення движка реохорда і пов'язаної з ним стрілки приладу пропорційне концентрації контрольованого розчину. Температурну похибку вимірювань компенсують металевим термометром опору R_t , який під'єднаний у мостовий коригувальний ланцюг $R_t - R_1 - R_2 - R_3$ і розміщений у контрольованому розчині.

У височастотних безконтактних концентрометрах вимірювання здійснюють з використанням змінної напруги високої частоти (від декількох МГц до сотень МГц). Вимірювальна комірка такого концентрометра являє собою або конденсатор (рис. 11.5 а), або котушку індуктивності (рис. 11.5 б).

На рисунку 11.6 показана блок-схема автоматичного височастотного концентрометра.



а) б)
Рисунок 11.5 – Вимірювальна
комірка високочастотних
безконтактних
концентратомірів:
а) ємнісна;
б) індуктивна

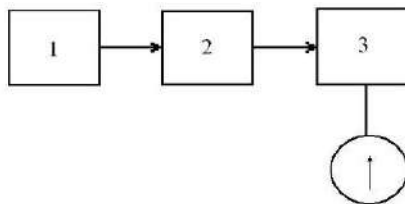


Рисунок 11.6 – Блок-схема
автоматичного
високочастотного
концентратоміра:

1 – генератор високої частоти;
2 – первинний перетворювач;
3 – вимірювальна схема

У більшості конструкцій приладів генератор 1 виконує функції лише джерела напруги високої частоти, який живить перетворювач 2 конденсаторного або індуктивного типу. Вимірювальна схема 3 контролює будь-якої параметр перетворювача, який функціонально пов'язаний з концентрацією контрольованого розчину.

Під час використання індуктивних первинних перетворювачів (див. рис. 11.5 б) вимірювальна схема зазвичай контролює зміну втрат високочастотної енергії, які характеризують зміну активної провідності перетворювача.

Якщо ж в концентратомірі використаний конденсаторний перетворювач (див. рис. 11.5 а), то контрольованим параметром може бути як активна складова його провідності (під час вимірювання концентрації електропровідних середовищ), так і величина еквівалентної ємності, якщо контрольоване середовище неелектропровідне. В останньому разі концентратомір називають *діелкометром*, оскільки вимірювання концентрації відбувається

за величиною діелектричної проникності контрольованого розчину.

За величиною діелектричної проникності можна визначити концентрацію лише того компонента суміші, діелектрична проникність якого значно більша, ніж в інших компонентах. Серед рідин найбільшу діелектричну проникність має вода. Тому автоматичні діелкометри найчастіше використовують для вимірювання концентрації води в сумішах з органічними рідинами (тобто для вимірювання їх вологості).

11.2 Потенціометричний метод аналізу

Потенціометричний метод аналізу розчинів електролітів заснований на вимірюванні електродних потенціалів двох спеціальних електродів, поміщених у випробовуваний розчин.

Потенціометричний метод найбільш широко застосовують для визначення активності іонів водню, що характеризує кислотні або лужні властивості розчину.

Появу водневих іонів у розчині викликано дисоціацією частини молекул води, що розпадаються на іони водню H^+ і гідроксиду OH^- у рівних кількостях, отже, їх концентрації однакові (нейтральний розчин).

Водні розчини можуть бути нейтральними, кислими або лужними. В кислих розчинах міститься надлишок іонів водню H^+ , а в лужних – надлишок іонів гідроксиду OH^- . У нейтральних розчинах концентрація цих іонів завжди однакова і водночас надзвичайно мала – по 10^{-7} моль/л кожного іона. Іонний добуток води $[H^+] \cdot [OH^-] = 10^{-7} \cdot 10^{-7} = 10^{-14}$ моль/л. Іонний добуток води за кімнатної температури завжди зберігає стале значення, причому незалежно від зміни концентрацій $[H^+]$ і $[OH^-]$. Наприклад, якщо додати у воду кислоту (тобто внести сторонні іони H^+), то в розчині знизиться концентрація іонів $[OH^-]$, але іонний добуток збереже значення 10^{-14} . У разі додавання лугу (тобто сторонніх іонів OH^-) знизиться концентрація іонів

$[H^+]$, але значення іонного добутку теж не зміниться.

У кислотних розчинах концентрація іонів водню H^+ більша ніж 10^{-7} моль/л ($10^{-7} < [H^+] \leq 10^0$). Наприклад, у розчині сильної одноосновної кислоти (наприклад, HCl або HBr) концентрації 1 моль/л концентрація іонів водню H^+ також становитиме 1 моль/л. Іонний добуток води і в такому розчині зберігає своє значення: $[H^+] \cdot [OH^-] = 10^0 \cdot 10^{-14} = 10^{-14}$ моль/л. Отже, концентрація іонів гідроксиду OH^- становить 10^{-14} моль/л.

У розчині сильного лугу $NaOH$ концентрації 1 моль/л концентрація іонів OH^- також становитиме 1 моль/л. Іонний добуток води набуде вигляду $[H^+] \cdot [OH^-] = 10^{-14} \cdot 10^0 = 10^{-14}$ моль/л. Отже, концентрація іонів H^+ становить 10^{-14} моль/л.

Звідси випливає, що якщо вибірково визначити кількість іонів водню H^+ , то можна визначити кислотність розчину.

Для зручнішого вираження концентрації іонів водню H^+ датський хімік Зеренсен увів поняття pH (p – початкова буква датського слова *Potenz* – ступінь; H – хімічний символ водню). Згідно з визначенням, поданим Зеренсеном, водневий показник pH – десятковий логарифм концентрації іонів водню H^+ , узятий з оберненим знаком:

$$pH = -\lg[H^+]. \quad (11.2)$$

Отже, для кислотних розчинів $0 \leq pH < 7$, для лужних розчинів $7 < pH \leq 14$.

Для вимірювання величини pH використовують різні електроди, що описують рівнянням Нернста, в якому потенціал електрода є результатом не концентрації, а активності іонів. У зв'язку з цим застосовують інше визначення поняття pH – це логарифм активності іонів водню, узятий з оберненим знаком:

$$pH = -\lg[H^+] \cdot f_{H^+} = -\lg[a], \quad (11.3)$$

де f_{H^+} – коефіцієнт активності іона водню.

Поки ще немає способу експериментального визначення коефіцієнта активності окремого іона, але його можна визначити, якщо виміряти електродний потенціал.

Так, під час занурення металевого електрода в розчин, що містить іони цього металу, між розчином і електродом утворюється різниця потенціалів, яка в електрохімії одержала назву *електродного потенціалу*. Величину електродного потенціалу визначають за законом Нернста:

$$E = E_0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln a, \quad (11.4)$$

де E_0 – нормальний електродний потенціал ($E_0 = E$ при $a = 1$);

R – універсальна газова стала ($R = 8,31$ Дж/(моль \cdot К));

T – абсолютна температура розчину;

n – валентність іонів металу в розчині;

F – число Фарадея ($F = 9\,6500$ Кл/моль);

a – активність іонів металу в розчині, що дорівнює добутку його концентрації C на коефіцієнт активності f . В ідеальних розчинах $f = 1$ і $a = C$; у реальних розчинах $f < 1$ і $a < C$, тобто активність завжди менша за істинну концентрацію іонів у розчині.

Нормальний електродний потенціал E_0 має сталу величину, характерну для кожного металу. Електрод набуває такий потенціал в одонормальному розчині своїх іонів.

Практично виміряти потенціал одного електрода (тобто різницю потенціалів між електродом і розчином) неможливо. Тому електрохімічна вимірювальна комірка потенціометричного концентратоміра складається з двох електродів. Потенціал одного з цих електродів, названого *вимірювальним*, змінюється залежно від зміни активності контрольованого іона (у pH -метрах іону водню H^+). Потенціал другого електрода, названого *допоміжним*, не залежить від активності

контрольованих іонів і в процесі вимірювань залишається незмінним. ЕРС вимірювальної комірки $E_{\text{ком}}$ дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів обох електродів.

Найбільш поширеним допоміжним електродом є *каломельний електрод* (рис. 11.7). Він складається з двох порожнин, розділених пористою перегородкою. У верхній частині електрода розміщена металева ртуть, покрита шаром малорозчинної солі Hg_2Cl_2 , яку називають *каломелю*. У нижній порожнині електрода розміщується розчин KCl певної концентрації. У місці дотику контрольованого розчину з електролітичним контактом встановлюють пористі перегородки 1, через які розчин хлористого калію поступово просочується в контрольований розчин.

У сучасних автоматичних *pH*-метрах за вимірювальні електроди переважно застосовують скляні електроди.

Скляний електрод 4 (рис. 11.8) являє собою циліндричну трубку, до нижнього кінця якої припаяна сферична частина, яку називають мембраною 1 та виготовляють зі спеціального сорту скла. Матеріал мембрани вибирають таким чином, що це скло пропускає іони водню H^+ і не пропускає інших іонів. До складу мембрани входить велика кількість катіонів лужних та лужноземельних металів (K^+ , Na^+ , Li^+ та інші), тому вона має нижчий електричний опір, ніж звичайне скло. Незважаючи на це електричний опір скляного електрода може досягати 1 000 МОм. Мембрана є чутливим елементом електрода.

У скляний посуд 2 засипають суспензію AgCl у розчині HCl і подрібнений сірчаний дріт. Отже, всередині трубки з кулькою розміщений хлорсрібний електрод, потенціал якого сталий та не впливає на величину потенціалу скляного електрода. Для вимірювання *pH* скляний електрод занурюють у досліджуваний розчин. У поверхневий шар мембрани починають інтенсивно проникати іони водню H^+ , витісняючи іони основного металу, що входять до складу скла. Мембрана насичується воднем. Поверхня скла такої мембрани в розчині набуває потенціалу,

величина якого залежить від концентрації водневих іонів у розчині.

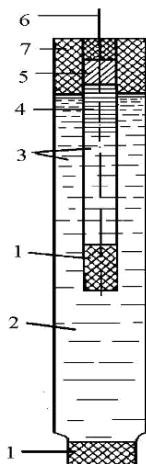


Рисунок 11.7 – Каломельний допоміжний електрод:

- 1 – напівпроникна перегородка;
- 2 – скляний корпус;
- 3 – розчин KCl;
- 4 – шар каломелі;
- 5 – шар ртуті;
- 6 – вихідний контакт;
- 7 – пробка з ізоляційного матеріалу

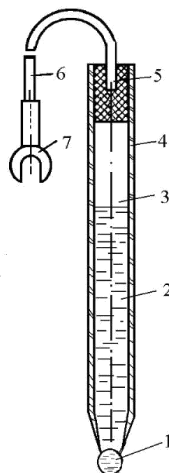


Рисунок 11.8 – Скляний електрод:

- 1 – чутлива мембрана;
- 2 – розчин соляної кислоти;
- 3 – допоміжний контактний електрод;
- 4 – скляний корпус;
- 5 – пробка з ізоляційного матеріалу;
- 6 – контактний дріт;
- 7 – кабельний наконечник

На рисунку 11.9 наведена принципова схема автоматичного pH -метра. Прилад призначений для роботи в комплекті зі скляним вимірювальним та каломельним допоміжним електродами.

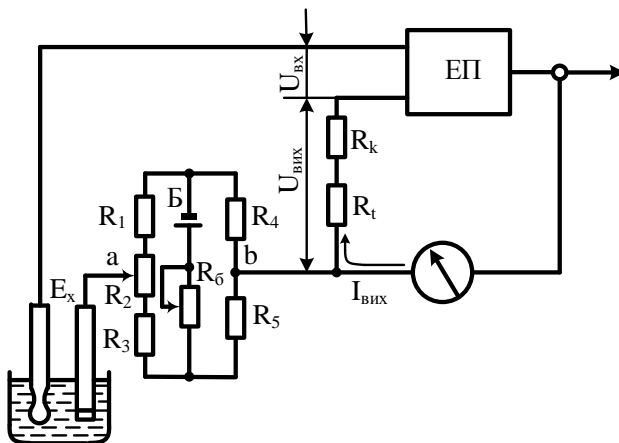


Рисунок 11.9 – Принципова схема автоматичного pH -метра

У pH -метрі використаний компенсаційний метод вимірювання ЕРС датчика E_x , яку врівноважують вихідною напругою $U_{вих}$ електронного підсилювача ЕП. Різницю цих величин $E_x - U_{вих} = U_{вх}$ подають на вхід електронного підсилювача ЕП з великим коефіцієнтом підсилення $k_{нід}$.

Оскільки $k_{нід} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$, то $E_x = U_{вх} + U_{вих} = U_{вих} \left(1 + \frac{1}{k_{нід}} \right)$ і за чималої величини $k_{нід}$ ЕРС $E_x \approx U_{вих}$.

Отже, вимірювану ЕРС практично повністю врівноважує вихідна напруга підсилювача. Такий метод врівноваження називають *методом статичної компенсації*, оскільки під час його використання зникає необхідність у застосуванні рухливих елементів (реверсивного двигуна і реохорда).

Напруга $U_{вих}$ утворюється від протікання вихідного струму підсилювача $I_{вих}$ по каліброваному опорі R_k і термометру опорі R_t . Останній використовують для автоматичної компенсації температурної похибки вимірювань pH -метра.

Вихідний струм підсилювача $I_{\text{вих}}$, пропорційний вимірюваній величині pH_x , вимірюють показувальним приладом, шкала якого градуйована в одиницях pH . Показання pH -метра можуть передавати на вторинний вимірювальний прилад – стандартний електронний потенціометр.

У ланцюг вимірювальної комірки pH -метра послідовно з каломельним електродом під'єднана мостова схема на опорах $R_1 - R_5$, яку живлять від батареї Б. Змінний опір R_6 необхідний для установалення робочого струму батареї. Величину різниці потенціалів на вершинах моста ab встановлюють зміною положення движка змінного опору R_2 . Зміна величини U_{ab} дозволяє зміщувати початок шкали під час градуювання pH -метра.

Потенціометричний метод аналізу застосовують також для вимірювання окисно-відновних потенціалів з використанням платинового електрода за вимірювальний електрод.

За величиною окисно-відновного потенціалу можна контролювати хід технологічного процесу, якщо його супроводжують окисленням або відновленням переробної речовини. Прилади для вимірювання окисно-відновних потенціалів аналогічні pH -метрам.

11.3 Абсорбційні методи спектрального аналізу

Абсорбційні методи спектрального аналізу засновані на використанні властивостей газів і рідин вибірково поглинати випромінювання з певною довжиною хвилі залежно від хімічного складу цих речовин. Відповідно до закону Ламберта – Бера, інтенсивність J_λ монохроматичного паралельного потоку випромінювання з довжиною хвилі λ , що пройшов крізь шар аналізованої речовини товщиною l і концентрацією C_x , пов'язана з інтенсивністю вхідного потоку випромінювання $J_{\lambda 0}$ такою залежністю:

$$J_\lambda = J_{\lambda 0} \cdot \exp(-\varepsilon_\lambda \cdot l \cdot C_x), \quad (11.5)$$

де $\varepsilon_\lambda = \text{const}$ – коефіцієнт поглинання аналізованою речовиною випромінювання з довжиною хвилі λ .

Звідси випливає, якщо $J_{\lambda 0} = \text{const}$ і $l = \text{const}$, то J_λ є однозначною функцією концентрації C_x просвічуваної речовини.

Для вибіркового вимірювання концентрації одного компонента суміші необхідно використовувати випромінювання з такою довжиною хвилі, на якій визначений компонент має найбільший щодо інших компонентів коефіцієнт поглинання.

Будь-який концентратомір, дія якого заснована на використанні абсорбційних методів спектрального аналізу, складається з трьох основних елементів: джерела випромінювання, кювети, в яких розміщується шар аналізованої речовини певної товщини, і пристрою, що вимірює інтенсивність випромінювання J_λ на виході з кювети і перетворює його у вихідний сигнал (показання) приладу.

Найбільшого поширення набули прилади компенсаційного типу з диференціальною (двоканальною) вимірювальною схемою.

На рисунку 11.10 показана принципова схема такого приладу.

Від джерела 1 випромінювання поширюється двома аналогічними оптичними каналами – вимірювального та порівняльного. У кожному з них є коліматор 2, діафрагма 3, дзеркало 4 і світлофільтр 5. У порівняльному каналі кювета 6 заповнена еталонною речовиною постійного складу і тому має постійну оптичну щільність. У вимірювальному каналі розміщена робоча кювета 11, крізь яку безперервно проходить аналізована речовина, а також компенсатор 7. На виході з обох каналів потоки випромінювання реєструють фотоприймачі 8, під'єднані в диференціальну вимірювальну схему. Сигнал, пропорційний різниці вихідних сигналів приймачів, після підсилення в електронному підсилювачі 9 впливає на компенсатор 7 (оптичний клин) у бік врівноваження схеми. Відліковий пристрій 10 реєструє переміщення компенсатора, що є мірою концентрації визначеного компонента.

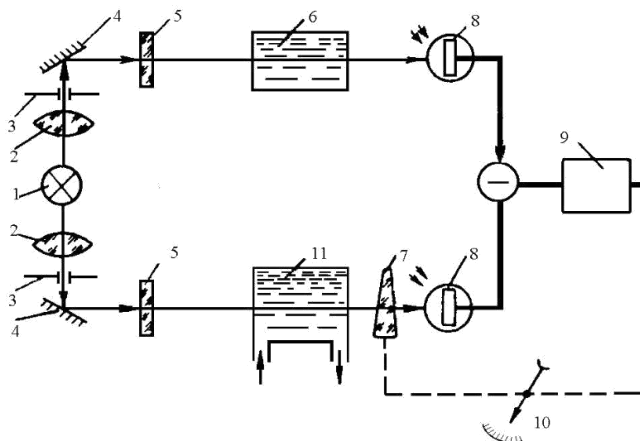


Рисунок 11.10 – Принципова схема двоканального абсорбційного спектрального концентратора компенсаційного типу:

- 1 – джерело випромінювання; 2 – коліматор;
- 3 – діафрагма; 4 – дзеркало; 5 – світлофільтр;
- 6 – порівняльна кювета; 7 – компенсатор;
- 8 – фотоприймач; 9 – електронний підсилювач;
- 10 – відліковий пристрій; 11 – робоча кювета

В абсорбційних спектральних концентраторах використовують, головним чином, випромінювання з довжинами хвиль інфрачервоного ($0,76 \text{ мкм} \leq \lambda$), видимого ($0,4 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 0,76 \text{ мкм}$) і ультрафіолетового ($\lambda \leq 0,4 \text{ мкм}$) ділянок спектра.

Газоаналізатори інфрачервоного поглинання є найбільш поширеними абсорбційними спектральними концентраторами, в яких застосовують довжини хвиль інфрачервоного діапазону. Вони призначені для вимірювання концентрації газів і парів речовин, молекули яких складаються з двох і більше різних атомів або іонів.

За приймачі-перетворювачі інтенсивності інфрачервоного випромінювання найчастіше використовують оптико-акустичні перетворювачі, дія яких заснована на властивості газів поглинати інфрачервону радіацію.

Фотоколориметрами називають абсорбційні спектральні концентратоміри, в яких використовують випромінювання видимого діапазону спектра. У цьому разі концентрацію вимірюють за інтенсивністю забарвлення аналізованої речовини. Фотоколориметри застосовують для вимірювання концентрації газів і рідин. Зазвичай вони працюють у широкій області спектра, тому як джерело випромінювання у них використовують лампи розжарювання.

Здебільшого пристрій фотоколориметрів заснований на компенсаційному методі вимірювання. На рисунку 11.11 наведена принципова схема фотоколориметра, призначеного для вимірювання концентрації забарвлених розчинів.

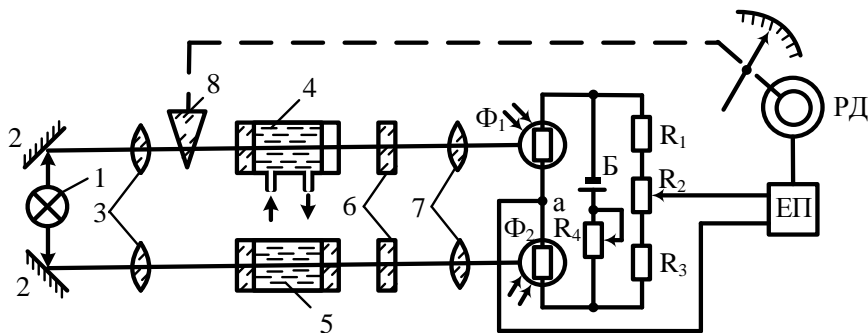


Рисунок 11.11 – Принципова схема автоматичного фотоколориметричного концентратоміра:

- 1 – джерело світла; 2 – дзеркало; 3 – конденсаторні лінзи;
- 4 – робоча кювета; 5 – порівняльна кювета;
- 6 – світлофільтри; 7 – об'єктив; 8 – оптичний клин

Світло від джерела 1 поширюється двома потоками. Відбившись від дзеркал 2, вони потрапляють в конденсаторні лінзи 3, які створюють паралельні потоки, і далі проходять крізь робочу 4 і порівняльну 5 кювети. На виході з кювет встановлені світлофільтри 6, які виділяють діапазон довжин хвиль, що відповідає максимуму поглинання контрольованого компонента. Потім потоки світла фокусують об'єктивами 7 на світлочутливу поверхню двох фотоопорів Φ_1 і Φ_2 , під'єднаних до мостової врівноваженої схеми з опорами $R_1 - R_4$, і живлять від батареї Б.

У разі рівного розподілу освітленості фотоопору міст розміщений у рівновазі, і різниця потенціалів на його вершинах *ab* дорівнює нулю. Якщо концентрація контрольованого розчину відрізняється від концентрації еталонного розчину, то рівність освітленостей фотоопору порушується, міст виходить зі стану рівноваги, і на вході електронного підсилювача ЕП з'являється сигнал розбалансу. Підсилений сигнал приводить в обертання реверсивний двигун РД, який через систему передач переміщує оптичний клин (компенсатор) 8 у вимірювальному каналі приладу до врівноваження схеми. У момент компенсації стрілка відлікового пристрою показує нове значення концентрації.

Для вимірювання концентрації газів зазвичай використовують характерну кольорову реакцію газу зі спеціальним індикаторним розчином. Аналізований газ барботують через розчин індикатора, що заповнює вимірювальну кювету, фарбуючи його у відповідний колір. Інтенсивність забарвлення, яка залежить від концентрації газу, контролюють фотоколориметром. Порівняльну кювету заповнюють чистим індикаторним розчином. Вимірювання здійснюють компенсаційним методом з урівноваженням оптичної вимірювальної схеми компенсаційним клином. За фотоелектричні перетворювачі використовують фотоелементи та фотоопори.

У деяких випадках індикатора речовину наносять на поверхню стрічки, забарвлення якої змінюється під час дотику з аналізованим газом. Ступінь зміни забарвлення, яке залежить від концентрації газу, контролюють фотоелектричною вимірювальною схемою.

Концентрацію забарвлених газів, наприклад NO_2 , можна вимірювати фотоколориметром без застосування індикаторів.

Газоаналізатори ультрафіолетового поглинання застосовують для вимірювання концентрації парів ртуті, хлору, бензолу та інших речовин, що мають характерні лінії або смуги поглинання в ультрафіолетовій частині спектра.

На рисунку 11.12 наведена принципова схема газоаналізатора ультрафіолетового поглинання, призначеного для вимірювання концентрації парів ртуті в повітрі. Джерелом

випромінювання є ртутна лампа 1, в якій близько 70 % енергії випромінювання має довжину хвилі, відповідну максимуму поглинання парів ртуті. Тому у цьому разі немає необхідності в застосуванні світлофільтрів.

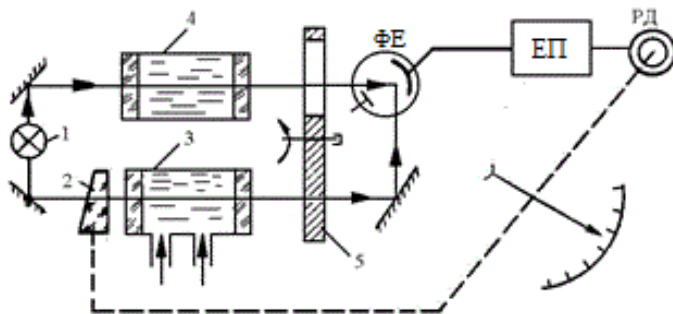


Рисунок 11.12 – Принципова схема газоаналізатора ультрафіолетового поглинання:

- 1 – ртутна лампа; 2 – компенсатор (оптичний клин);
3 – робоча кювета; 4 – порівняльна кювета; 5 – обтюратор

Концентрацію вимірюють компенсаційним методом з урівноваженням оптичної вимірювальної схеми компенсаційним оптичним клином (компенсатором) 2. Особливістю цього приладу є застосування одного приймача-перетворювача інтенсивності випромінювання в електричний сигнал. Як перетворювач використовують фотоелемент ФЕ, на який по черзі потрапляють потоки радіації з виходу вимірювального та порівняльного оптичних каналів; у вимірювальному каналі розміщується робоча кювета 3, а в порівняльному каналі – кювета 4. Переривання потоків радіації здійснюють обтюратором 5 у протифазі, тобто якщо потік вимірювального каналу перекритий, то потік порівняльного каналу відкрито.

У разі рівного розподілу інтенсивності випромінювання на виході каналів освітленість фотоелемента в послідовні напівперіоди залишається незмінною. Електронний підсилювач ЕП чутливий лише до змінної напруги, тому сигнал на його виході дорівнює нулю. Якщо ж оптична щільність робочого

каналу змінюється, то рівність освітленості фотоелемента в послідовні напівперіоди порушується. Водночас на вхід підсилювача подають змінну напругу, амплітуда якої пропорційна різниці інтенсивностей потоків випромінювання в робочому і порівняльному каналах. Підсилений сигнал приводить в обертання реверсивний двигун РД, який через систему передач переміщує компенсаційний клин і стрілку відлікового пристрою газоаналізатора.

Автоматичні фотонейфелометри призначені для вимірювання концентрації твердих зважених частинок у газах і рідинах за зміною інтенсивності світлового потоку, що проходить крізь шар контрольованого середовища. Ослаблення світлового потоку в цьому разі пояснюють розсіюванням світла зваженими частинками. За джерело випромінювання у фотонейфелометрах застосовують, головним чином, лампу розжарювання, а приймачами є фотоеlementи і фотоопори. Вимірювальні схеми фотонейфелометрів аналогічні схемам фотоколометрів (див. рис. 11.11).

11.4 Інші непрямі методи аналізу

Рефрактометричний метод аналізу заснований на використанні залежності показника заломлення аналізованого розчину від його концентрації.

В автоматичних рефрактометрах застосовують два основні методи вимірювання показника заломлення:

- за кутом відхилення світлового променя у скляній призмі, наповненій аналізованим розчином;

- метод повного внутрішнього відбиття.

Під час використання першого методу зазвичай застосовують кювети диференціального типу, що складаються з двох частин (рис. 11.13). Одну з них заповнюють порівняльним розчином незмінної концентрації C_a , а через другу проходить аналізований розчин невідомої концентрації C_x . Якщо $C_a = C_x$, то промінь світла проходить через кювету без відхилення. Якщо ж $C_a \neq C_x$, то кут відхилення променя φ пропорційний різниці концентрацій аналізованого і порівняльного розчинів.

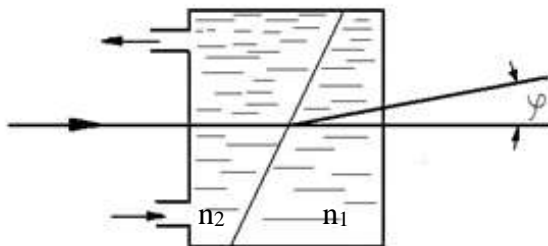


Рисунок 11.13 – Кювета диференціального типу:
 n_1 – показник заломлення порівняльного розчину;
 n_2 – показник заломлення аналізованого розчину;
 φ – кут відхилення променя

Така конструкція кювети забезпечує також автоматичну температурну компенсацію вимірювань, оскільки порівняльний і аналізований розчин мають дуже близькі температурні коефіцієнти зміни показника заломлення і практично однакову температуру.

На рисунку 11.14 наведена принципова схема автоматичного рефрактометра, в якому використана кювета диференціального типу. Промінь світла від джерела 1 проходить крізь конденсорну лінзу 2 й діафрагму 3 і потрапляє в кювету 4. Якщо концентрація контрольованого розчину дорівнює концентрації порівняльного розчину, то промінь проходить крізь кювету без відхилення і рівномірно освітлює обидві фотоопори Φ_1 і Φ_2 .

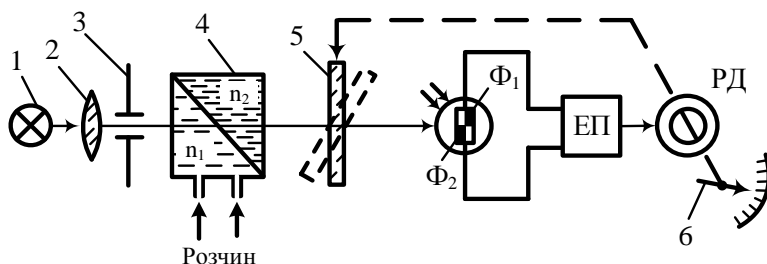


Рисунок 11.14 – Принципова схема автоматичного рефрактометра з кюветою диференціального типу:

1 – джерело світла; 2 – конденсорна лінза; 3 – діафрагма;
 4 – кювета; 5 – компенсаційна пластина; 6 – відлікова система

Під час зміни концентрації аналізованого розчину промінь світла відхиляється у ту або іншу сторону і рівність освітленостей фотоопорів порушується. Внаслідок цього на вхід електронного підсилювача ЕП подають сигнал, знак і величина якого визначають відхиленням концентрації контрольованого розчину від порівняльного.

Цей сигнал підсилюють в ЕП і приводять в обертання реверсивний двигун РД, який через систему передач повертає компенсаційну пластину 5 доти, поки рівність освітленостей не відновиться. Водночас кут повороту пластини і пов'язаної з нею відлікової системи приладу 6 пропорційний зміні концентрації контрольованого розчину.

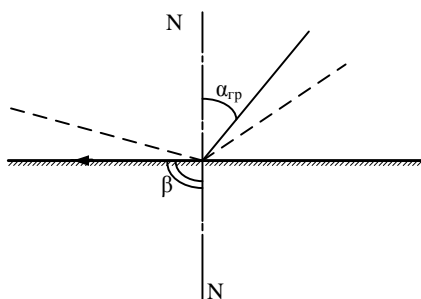


Рисунок 11.15 – Повне внутрішнє віддзеркалення променя:

$\alpha_{гр}$ – граничний кут падіння;

β – кут заломлення

Другий метод вимірювання показника заломлення заснований на використанні явища повного внутрішнього відбиття, яке відбувається таким чином (рис. 11.15). Під час переходу променя з середовища з великим показником заломлення в середовище з меншим показником заломлення можна підібрати такий граничний кут падіння $\alpha_{гр}$, за якого кут заломлення β буде дорівнює 90° . У цьому разі промінь не влучає в оптично менш щільне

середовище, а проходить по межі поділу середовищ. За будь-якого іншого кута падіння, більшого граничного, промінь повністю відбивається на межі розділу. Кут відбиття у цьому разі визначають відношенням показників заломлення середовищ. Якщо в одній з них показник заломлення незмінний, то кут відбиття буде залежати лише від показника заломлення другого (контрольованого) середовища.

На рисунку 11.16 наведена принципова схема автоматичного рефрактометра, в якому використовують явище повного внутрішнього відбиття.

Промінь світла від джерела 1, потрапляючи на окреслену по радіусу ділянку поверхні скляної призми спеціальної форми 2, проходить крізь призму, причому кут падіння променя на граничну поверхню дотику призми 2 з контрольованим розчином більше граничного, тому промінь повністю відбивається. Кут відбиття контролюють фотоелектричною системою що складається з фотоелектричного приймача 3, електронного підсилювача ЕП і реверсивного двигуна РД. Під час відхилення променя з'являється вихідний сигнал фотоприймача, який підсилюють. Цей сигнал призводить у дію РД. Останній переміщує фотоприймач до границі розподілу світла і тіні. Переміщення фотоприймача, пропорційне зміні концентрації контрольованого розчину, реєструють відліковим пристроєм 4.

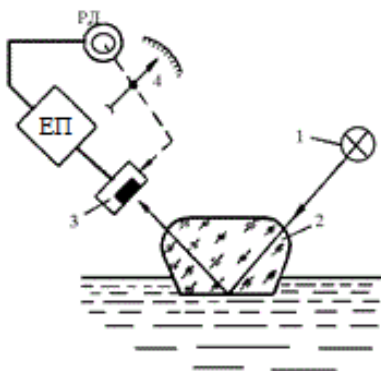


Рисунок 11.16 – Принципова схема автоматичного рефрактометра, який працює на повному внутрішньому відбитті променя:

1 – джерело світла; 2 – призма; 3 – фотоелектричний приймач; 4 – відліковий пристрій

Перевагою автоматичних рефрактометрів, в основі яких лежить метод повного внутрішнього відбиття, є можливість

контролю концентрації непрозорих середовищ, наприклад, нафтопродуктів.

Термокондуктометричний метод аналізу, що застосовують для вимірювання концентрації газів, заснований на використанні відмінності теплопровідності окремих компонентів газових сумішей.

Теплопровідність газової суміші адитивно залежить від теплопровідності окремих компонентів:

$$\lambda_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n c_i \lambda_i, \quad (11.6)$$

де $\lambda_{\text{сум}}$ – питома теплопровідність газової суміші з n компонентів;

c_i – відносна концентрація i -го компонента в суміші;

λ_i – питома теплопровідність i -го компонента.

Якщо теплопровідність контрольованого компонента істотно відрізняється від теплопровідності інших, то за теплопровідністю суміші можна визначити концентрацію цього компонента.

Внаслідок малих абсолютних значень теплопровідності λ_i , важко безпосередньо виміряти теплопровідність газів. У термокондуктометричних газоаналізаторах теплопровідність контролюють за зміною умов тепловіддачі нагрітої струмом металеві спіралі, які залежать від теплопровідності оточуючого її газу.

Якщо теплопровідність газу збільшується, то збільшується і тепловіддача нагрітої спіралі до стінок камери перетворювача через оточуючий її газ, унаслідок чого температура спіралі зменшується. Зниження температури супроводжується зменшенням опору нитки. Відповідно під час зменшення теплопровідності газу, оточуючого нитку, її опір зростає.

Звідси випливає, що опір нагрітої спіралі залежить від концентрації газу, що аналізують.

Принципова вимірювальна схема термокондуктометричного газоаналізатора (рис. 11.17) являє

собою неврівноважений міст, плечі якого утворені чотирма однаковими нагрітими елементами (платиновими спіралями, нагрітими до температури 100°C і поміщеними в газові камери) $R_1 - R_4$. Температуру спіралей регулюють зміною сили струму, для чого використовують опір R .

Два елементи R_1 і R_3 містяться у вимірювальних камерах 1 первинного перетворювача, через які безупинно прокачують аналізований газ. Два інших елементи R_2 і R_4 розміщені в ізольованих камерах 2, заповнених повітрям. Усі чотири камери об'єднані в монолітному металевому корпусі датчика і мають завдяки цьому однакову температуру.

Якщо теплопровідність аналізованого газу відрізняється від теплопровідності повітря, то умови тепловіддачі для елементів R_1 , R_3 та R_2 , R_4 різні, а отже, різні й їх опори. Виниклий розбаланс мосту за величиною напруги між точками «а» і «б» пропорційний концентрації певної складової в аналізованому газі. Отже, шкалу мілівольтметра mV , що вимірює напругу в діагоналі моста U_{ab} , можна градуувати безпосередньо в одиницях концентрації.

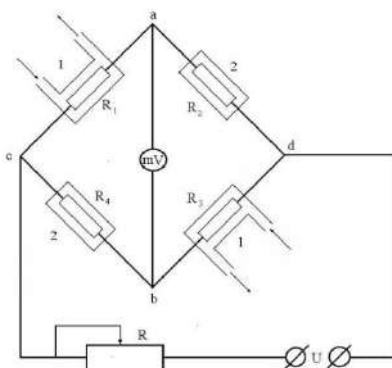


Рисунок 11.17 – Принципова вимірювальна схема термокондуктометричного газоаналізатора:
1 – вимірювальні камери; 2 – порівняльні камери

Термокондуктометричний метод аналізу є невибірковим, оскільки теплопровідність газової суміші залежить від теплопровідності всіх її компонентів. Тому для одержання точних результатів вимірювань неприпустима наявність у вже згадуваному газі компонентів, теплопровідність яких сильно відрізняється від теплопровідності визначеного компонента. Наприклад, під час вимірювання концентрації CO_2 в топкових газах попередньо випалюють у них водень, теплопровідність якого майже в 10 разів вища, ніж у CO_2 . В іншому разі незначні домішки H_2 істотно спотворили б результат вимірювань.

Термокондуктометричний принцип вимірювання застосовують для визначення таких компонентів, як H_2 , CO_2 , SO_2 , Ar , O_2 , NH_3 у топкових газах і в газах під час виробництва аміаку, хлору, аргону, сірчаної кислоти, а також для визначення концентрації водню в системі водневого охолодження турбогенераторів на теплових електростанціях. Недоліками таких типів газоаналізаторів є великий час установлення показань (інерційність), що досягає 120 секунд, і підвищена похибка (до 5 %).

У *термохімічному методі* аналізу для визначення вмісту аналізованого компонента використовують тепловий ефект реакції каталітичного окислення цього компонента. Сигналом вимірювальної інформації в термохімічних аналізаторах є температура, значення якої залежить від теплового ефекту хімічної реакції. Термохімічний принцип аналізу використовують для створення аналізаторів газів і рідин. Для створення термохімічних газоаналізаторів використовують хімічні реакції окислювання на каталітично активній поверхні, у полум'ї та у газових потоках. Для термохімічних газоаналізаторів рідин застосовують реакції розбавлення (розведення), нейтралізації і змішування, а також реакції з використанням специфічних реагентів.

Найбільшого застосування набули дві групи приладів. У приладах першої групи горіння відбувається на каталітично активній платиновій нитці, що є одночасно чутливим елементом – плечем вимірювального моста. У приладах цієї групи аналіз заснований на вимірюванні підвищення

температури під час згорання компонентів. У термохімічних газоаналізаторах другої групи реакція окислення відбувається всередині шару каталізатора, а тепловий ефект реакції вимірюють термометром опору або термобатареєю, що знаходиться в цьому каталізаторі.

На рисунку 11.18 наведена схема *термохімічного газоаналізатора*, у роботі якого використовують тепловий ефект реакції окислювання горючих газів на каталітично активній поверхні. У термохімічному аналізаторі аналізований газ повітряним насосом 3 прокачують через кран 10 і камеру 1. У камері є вибухозапобіжні сітки 2 і 7. Температуру в зоні каталізатора вимірюють чутливим елементом 4 (платиновим термометром опору). Для компенсації впливу змін температури аналізованого газу на результати вимірювань використовують порівняльний термометр опору 5, який вимірює температуру газу, що надходить до зони реакції. Останній закритий ковпачком 6 і використовують для усунення впливу зміни навколишньої температури на сигнал газоаналізатора.

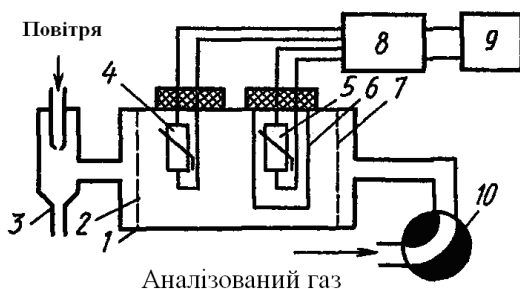


Рисунок 11.18 – Схема термохімічного газоаналізатора

Опір термометра 4 пропорційний температурі в зоні каталізатора, яка складається з температури вхідної газової суміші і температури хімічної реакції. Опір термометра 5 пропорційний температурі газу, що надходить на аналіз. Термометри ввімкнені в суміжні плечі мостової врівноваженої схеми. Чутливі елементи в термохімічних газоаналізаторах нагрівають струмом електричного мосту 8 до температури

200–500 °C. Під час згорання на поверхні вимірювального чутливого елемента горючого компонента, який потрібно визначити, температура елемента збільшується, що викликає збільшення електричного опору платиногого дроту, а це, у свою чергу, спричиняє розбалансування електричного мосту, вимірюваний вторинним приладом 9. Ця різниця показань термометрів, пропорційна концентрації компонента, що визначається.

Газоаналізатор, показаний на рисунку 11.18, використовують як сигналізатор вибухонебезпечних концентрацій газів і пари у повітрі.

Термомагнітний метод аналізу. В основу роботи термомагнітних газоаналізаторів покладені різні явища, пов'язані із взаємодією обумовленого компонента аналізованої газової суміші з магнітним полем.

Гази, які втягуються в магнітне поле, називають *парамагнітними*, а ті гази, які виштовхуються з магнітного поля, – *діамагнітними*. Кількісно магнітні властивості газів визначають величиною, так званою магнітною сприйнятливістю. Магнітна сприйнятливість парамагнітних газів є додатньою величиною, діамагнітних газів – від'ємною. Вона має властивість адитивності. Переважна більшість газів і пари є діамагнітними.

Магнітні газоаналізатори використовують для визначення тільки концентрації кисню в газовій суміші, тому що кисень на відміну від інших газів має сильні магнітні властивості, який є *парамагнітною речовиною*. Якщо відносну магнітну сприйнятливість кисню взяти за одиницю, то ця величина для всіх інших газів на два порядки менша, ніж у кисні. Тобто всі гази, крім кисню, є практично немагнітними речовинами.

Отже, контролювати вміст кисню в газовій суміші можна за величиною її магнітної сприйнятливості, оскільки остання, в основному, буде залежати від кількості кисню.

Безпосередньо виміряти магнітну сприйнятливість газу надзвичайно важко, оскільки її абсолютна величина дуже мала. Тому для вимірювань, в основному, застосовують метод термомагнітної конвекції, у якому використовують здатність

кисню швидко втрачати парамагнітні властивості під час нагрівання.

На рисунку 11.19 показаний один із найбільш поширених варіантів первинного перетворювача термомагнітного газоаналізатора. Датчик являє собою кільцеву камеру з горизонтальною перемичкою з немагнітного матеріалу, один з кінців якої розміщений між полюсами постійного магніту. Зовні на перемичку намотана нагрівальна металева спіраль, що складається з двох однакових секцій r_1 і r_2 , що нагріваються до певної температури струмом, який проходить по ним.

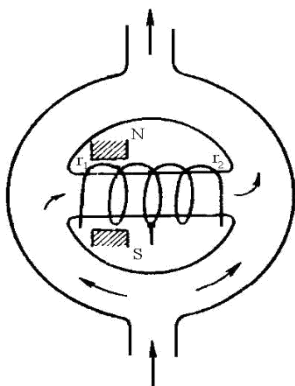


Рисунок 11.19 –
Схема первинного
перетворювача
термомагнітного
газоаналізатора
з кільцевою
вимірною
камерою

Аналізований газ надходить у кільцеву камеру знизу і, розділяючись на два потоки, проходить до верхнього вихідного отвору. Якщо в газі немає кисню, то ці потоки однакові і в перемичці рух газу не відбувається. Під час появи в газі кисню він втягується магнітним полем у перемичку і потрапляє в зону високої температури, створювану нагрівачами. Під час нагрівання кисень втрачає парамагнітні властивості і виштовхується з магнітного поля наступними холодними порціями газу. У результаті в перемичці виникає термомагнітна конвекція, швидкість якої залежить від концентрації кисню у вже згадуваному газі.

Швидкість термомагнітної конвекції вимірюють за ступенем охолодження нагрівального елемента потоком газу в перемичці. Секція r_1 , яку омиває більш холодний газ, охолоджується сильніше секції r_2 . У результаті охолодження змінюється величина опору секцій нагрівального елемента, які ввімкнені в схему неврівноваженого моста. Отже, напруга у вимірній діагоналі моста пропорційна швидкості

термомагнітної конвекції, тобто пропорційна концентрації кисню у вже згадуваному газі.

Точність вимірювання концентрації термомагнітним газоаналізатором залежить від незмінності витрати газу, що надходить на аналіз, і від стабільності його температури. Тому обидва зазначених параметри стабілізують за допомогою регулятора витрати і системи термостатування первинного перетворювача.

Іонізаційний метод аналізу. Принцип дії таких аналізаторів полягає в іонізації аналізованої речовини та вимірюванні іонного струму. На практиці аналітичного контролю застосовують у основному іонізаційні газоаналізатори, що розрізняються за способом іонізації аналізованого газу (іонізація радіоактивним випромінюванням, фотоіонізація, поверхнева іонізація, іонізація в тліючому розряді тощо).

На рисунку 11.20 наведена схема іонізаційного газоаналізатора. Аналізований газ надходить в іонізаційну камеру 1 з незмінною об'ємною витратою. Під дією джерела випромінювання 2 (α - або β -променів) молекули аналізованої бінарної або псевдобінарної газової суміші іонізуються. Між джерелом випромінювання 2 і анодом 3, який закріплено на фторопластовому ізоляторі 4, під дією електричного потенціалу стабілізованого джерела 7 проходить іонний струм. Значення цього струму вимірюють електрометричним перетворювачем 5, вихідний уніфікований сигнал якого подають на потенціометр 6.

Ефективний перетин іонізації газів є тією властивістю, яка визначає можливість вимірювання концентрації обумовленої компоненти відповідно до вимірюваної напруги. Напруга між джерелом і колектором 3 становить 100–300 В.

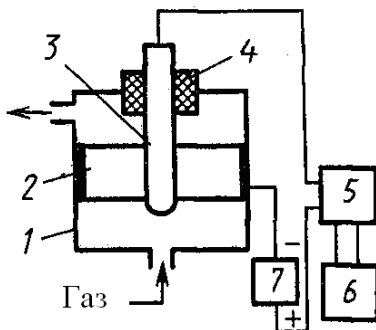


Рисунок 11.20 – Схема іонізаційного газоаналізатора

11.5 Хроматографічний метод аналізу складу газових сумішей

Хроматографічний метод застосовують для аналізу складу складних газових сумішей. Він заснований на різній швидкості сорбції окремих компонентів аналізованої суміші спеціально обраним сорбентом. Сорбцією називають поглинання твердим тілом або рідиною речовини з довкілля.

Аналіз за цим методом виконують у такий спосіб. Проба аналізованої речовини захоплюється потоком інертної речовини-носія і проходить крізь шар сорбенту, що заповнює хроматографічну колонку. Швидкість руху окремих компонентів аналізованої суміші вздовж колонки залежить від інтенсивності процесів сорбції: найбільшу швидкість руху мають компоненти, які сорбуються слабкіше інших і навпаки. Якщо умови для проведення аналізу обрані правильно, то за час руху крізь шар сорбенту проба встигне повністю поділитися на окремі компоненти, які будуть виділятися на виході хроматографічної колонки в певній послідовності. Почергове вимірювання вмісту кожного компонента, що виділився, здійснюють електричним методом.

Будь-який автоматичний хроматограф складається з трьох основних функціональних блоків: дозатора проби, хроматографічної колонки і детектора, який використовують для реєстрації компонентів, що виділяються з колонки аналізованої суміші й визначення їх концентрацій. Крім того, до конструкції приладу входить ряд допоміжних систем: пробоприготовна, система подачі речовини-носія тощо.

За видом застосовуваного сорбенту розрізняють адсорбційну і розподільну (абсорбційну) хроматографію. Під час адсорбційної хроматографії використовують тверді сорбенти, за які вибирають речовини з розвиненою пористою поверхнею (активоване вугілля, силікагель, оксид алюмінію, спеціальні сорти глини тощо). Під час розподільної хроматографії за сорбент беруть шар рідини, нанесений на поверхню інертної твердої

насадки. За рідкий сорбент застосовують вазелінове масло, дибутилфталат, нітробензол тощо.

На рисунку 11.21 наведена принципова схема автоматичного хроматографа, який працює у такий спосіб. З пробовідбірної системи приладу (на схемі не показана) аналізована суміш надходить

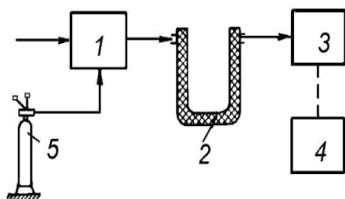


Рисунок 11.21 – Блок-схема автоматичного газового хроматографа:

- 1 – дозатор;
- 2 – хроматографічна колонка;
- 3 – детектор;
- 4 – вторинний прилад;
- 5 – балон

у дозатор 1, який періодично відбирає проби і подає їх на аналіз.

Потік речовини-носія (газу-носія), що надходить з балона 5, переносить пробу з дозатора в хроматографічну колонку 2, де відбувається поділ аналізованої суміші. Вимірювання кількості окремих компонентів, що виділяються з колонки, здійснюють детектором 3 і реєструють вторинним приладом 4 у вигляді хроматограм.

За *принципом дії* детектори, що використовують у хроматографах, поділяють на два типи: диференціальні та інтегральні.

Диференціальні детектори вимірюють концентрацію компонента, що виходить з колонки в даний момент, у потоці речовини-носія. Найбільш поширеними типами диференціальних детекторів для газу є термокондуктометричний і термохімічний (вони аналогічні термокондуктометричному і термохімічному газоаналізаторам). На рисунку 11.22 а показана типова хроматограма, тобто залежність вихідного сигналу хроматографа від часу τ , одержана за допомогою диференціального термокондуктометричного детектора. Окремі піки на графіку відповідають виділенню різних компонентів суміші, а проміжки між ними відповідають виходу з колонки чистої речовини-носія.

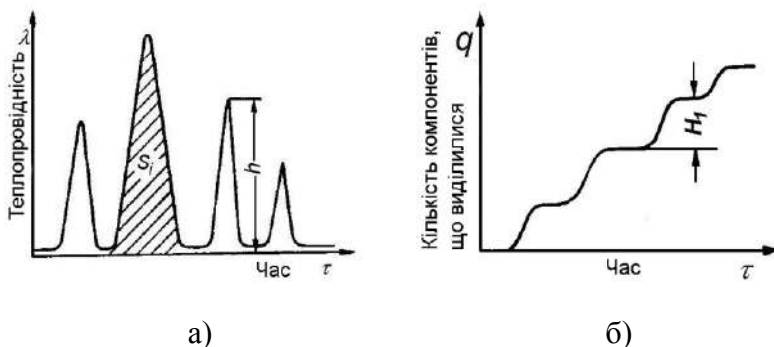


Рисунок 11.22 – Хроматограми:
а) диференціальна; б) інтегральна

Інтегральні детектори вимірюють загальну кількість усіх компонентів, що виділилися з колонки до даного моменту часу. У цьому разі хроматограма має вигляд ступінчастої кривої (рис. 11.22 б). Висота кожної сходинки H_i пропорційна кількості відповідного компонента в пробі.

Хроматографічні газоаналізатори використовують для визначення складу в димових газах горючих компонентів (H_2 , CO , CH_4 тощо), що характеризують хімічну неповноту палива, *негорючих компонентів* (CO_2 , O_2 , N_2 тощо), а також для вимірювання концентрації H_2 , NO_2 , SO_2 , NH_3 , H_2S і пари HCl , Hg , H_2O ароматичних вуглеводнів та інших речовин під час відповідного підборі шару сорбенту.

12 ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РІДИН І ГАЗІВ

12.1 Загальні відомості

До фізико-хімічних властивостей, автоматичний контроль яких здійснюють у хіміко-технологічних процесах, належить густина, в'язкість, вологість тощо.

Вимірювання *густини* рідин і газів здійснюють із метою керування хіміко-технологічними процесами і виконання операцій обліку кількості сировини, палива, реагентів і готової продукції.

Для хіміко-технологічних процесів, пов'язаних із виробництвом нафтових масел, консистентних змащень, полімерів, розчинників, *в'язкість* є показником, що однозначно визначає якість продукції. Тому її автоматичне вимірювання дозволяє створювати дуже ефективні системи автоматичного керування названими вище процесами.

Вологість – показник вмісту води в різних середовищах. Вимірювання вологості на виробництві – важливий аспект контролю якості та безпеки, оскільки його рівень впливає на перебіг технологічних процесів, фінансові витрати і здоров'я співробітників; багато речовин і продукти можуть зберігатися і використовуватися лише в певному діапазоні вологості. Вологість вимірюють у твердих пористих та сипучих матеріалах, в газах (концентрація парів води), у сумішах рідин (вміст молекул води). Сфери застосування такі: добувна та переробна промисловості (шлаки, руда, зола), будівництво (щебінь, пісок, гравій, силікатні маси, деревина), паперова та текстильна промисловість, напівпровідникова промисловість (вимірювання вологості під час технологічних процесів), сільське господарство (корми для тварин, борошно, зерно, насіння, захист насаджень, моніторинг вологості ґрунту), склади (підтримання мікроклімату), харчова промисловість (процеси сушки), фармацевтична промисловість, побутове застосування тощо.

12.2 Засоби вимірювання густини рідин і газів

Густиною ρ речовини називають фізичну величину обумовлену відношенням маси m речовини до займаного ним об'єму V :

$$\rho = m/V. \quad (12.1)$$

У деяких випадках використовують поняття відносної густини, обумовлене як відношення густини цієї речовини до густини іншої (умовної) речовини за певних фізичних умов.

Відносну густину рідкої речовини прийнято виражати відношенням її густини, взятої за нормальної температури (20 °С), до густини дистильованої води за температури 4 °С і позначають ρ_4^{20} .

Відносну густину газу прийнято виражати відношенням його густини до густини сухого повітря, узятого за нормальних умов (нормальна температура – 293,15 К, нормальний тиск – 760 мм рт. ст.).

Густина рідин і газів зменшується з підвищенням температури. Густина газів збільшується з підвищенням тиску, густина рідини практично від тиску не залежить.

Засоби вимірювання густини називають *денсиметрами* (денситометрами) (від лат. *densus* – густий і від грец. *metréō* – вимірюю).

Для вимірювання густини застосовують вагові денсиметри, поплавкові, гідроаеростатичні, гідрогазодинамічні, радіоізотопні, акустичні, вібраційні тощо.

12.2.1 Вагові (пікнометричні) денсиметри

У вагових денсиметрах густину визначають безперервно за зміною маси незмінного об'єму контрольованої рідини.

На рисунку 12.1 наведена принципова схема вагового денсиметра з пневматичним перетворювачем. Досліджувана рідина безперервно тече по петлеподібній трубці 1, що має гнучкі гумові патрубки або металеві сильфони. Петлеподібна трубка з'єднана з заслінкою 2 пневмоперетворювача типу «сопло-заслінка».

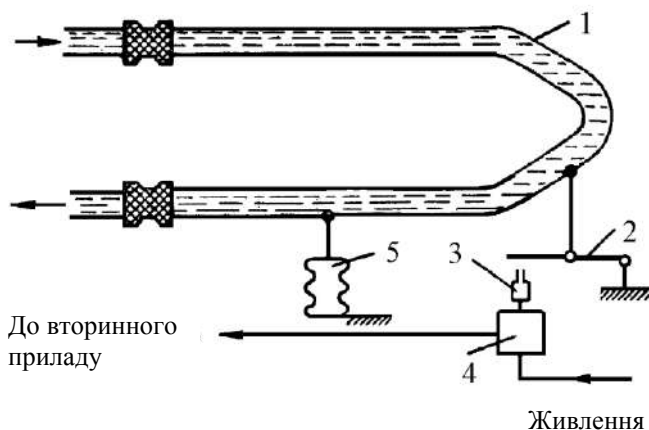


Рисунок 12.1 – Схема вагового денсиметра з пневматичним перетворювачем:

- 1 – петлеподібна трубка; 2 – заслінка; 3 – сопло;
4 – пневматичний підсилювач; 5 – сифон

Під час збільшення густини рідини вага петлеподібної трубки збільшується, вона опускається, проміжок між соплом 3 і заслінкою 2 зменшується, тиск повітря в перетворювачі збільшується. Пневматичний уніфікований сигнал через підсилювач 4 передають на сифон 5, який підтримує петлеподібну трубку. Тиск повітря в сифоні, що змінюється пропорційно до зміни густини рідини, вимірюють вторинним приладом, шкала якого градуйована в одиницях густини. Прилад вимірює густину за фактичної температури рідини, що заповнює в даний момент петлеподібну трубку.

Перевагами таких густиномірів є постійний перетин трубки, по якій тече рідина, і досить велика швидкість руху рідини, що виключає осадження на стінках петлеподібної трубки зважених твердих частинок.

Промисловість випускає вагові денсиметри з межами вимірювання від $0,5 \text{ г/см}^3$ до $2,5 \text{ г/см}^3$ та з класом точності 1–1,5.

12.2.2 Поплавкові (аерометричні) денсиметри

Поплавкові денсиметри виготовляють двох типів – з поплавком, що плаває, і з повністю зануреним поплавком.

У приладах першого типу мірою густини рідини є глибина занурення поплавка певної форми за сталої його ваги (ареометри постійної ваги).

У денсиметрів другого типу глибина занурення поплавка залишається незмінною, а змінюється діюча на нього виштовхувальна сила, пропорційна густині рідини (ареометри постійного об'єму).

На рисунку 12.2 наведена принципова схема денсиметра з поплавком, що плаває.

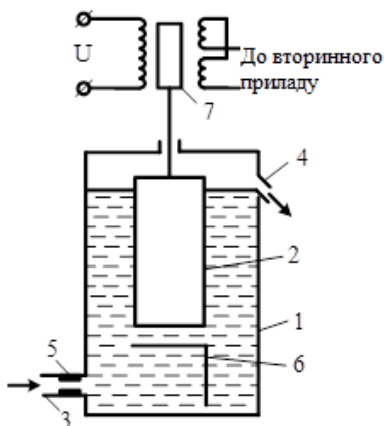


Рисунок 12.2 – Схема денсиметра з поплавком, що плаває:

- 1 – вимірювальна посудина; 2 – поплавок; 3 і 4 – патрубки;
5 – дросель; 6 – відбивні пластини; 7 – сердечник

Денсиметр складається з вимірювальної посудини 1, в якій плаває металевий поплавок 2. Рідина в прилад надходить через патрубок 3 і виходить з приладу через патрубок 4. Швидкість потоку встановлюють за допомогою дроселя постійного перетину 5. Відбивні пластини 6 оберігають поплавок від завихрень. Зміна густини рідини викликає переміщення поплавка і пов'язаного з ним сердечника 7, який переміщається в котушках диференційно-трансформаторного перетворювача. Вторинний

прилад (той, що показує або реєструє) градуюють в одиницях густини. Температурну компенсацію здійснюють за допомогою термометра опору, під'єданого у вимірювальну схему вторинного приладу.

Для вимірювання густини агресивних рідин денсиметр виготовляють з корозійностійких матеріалів.

На рисунку 12.3 показана принципова схема денсиметра з повністю зануреним поплавком, в якому застосований пневматичний перетворювач.

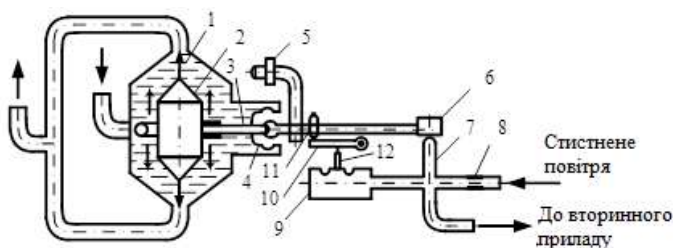


Рисунок 12.3 – Схема денсиметра з повністю зануреним поплавком і пневматичним перетворювачем:

- 1 – вимірювальна камера; 2 – поплавок; 3 – коромисло;
- 4 – ущільнювальний сільфон; 5 – протизага; 6 – заслінка;
- 7 – сопло; 8 – дросель; 9 – мембранна коробка; 10 – важіль;
- 11 – ролик; 12 – штовхач мембрани

Рідина з трубопроводу надходить через кільцевий розподільник у вимірювальну камеру 1 і по відповідному патрубку назад у трубопровід. Такий напрям руху рідини усуває дію потоку на поплавок 2. Поплавок насаджений на кінці коромисла 3, яке проходить через ущільнювальний сільфон 4. Коромисло врівноважують протизагою 5. Під час збільшення густини рідини поплавок під дією зростаючої виштовхувальної сили піднімається вгору і рівновага системи порушується.

Відновлення рівноваги відбувається за допомогою пневматичного перетворювача. Під час підняття поплавка заслінка 6 опускається, тиск повітря на виході з сопла 7 і в мембранній коробці 9 підвищується, штовхач 12 мембрани через

важіль 10 і ролик 11 переміщує правий кінець коромисла вгору, і заслінка відводиться від сопла.

Густину рідини визначають за тиском повітря на мембрану, яка пропорційна діючій на поплавок виштовхувальній силі. Шкала вторинного приладу градуйована в одиницях густини. Нижню межу вимірювань регулюють переміщенням протизваги 5; верхня межа і діапазон вимірювань можна змінювати зміною розмірів поплавка і мембрани. Витрату повітря встановлюють за допомогою дроселя постійного перетину 8.

12.2.3 Гідростатичні (п'єзометричні) денсметри

Принцип дії гідростатичних денсметрів заснований на залежності тиску P стовпця H аналізованої рідини або газу від густини ρ цих середовищ:

$$P = \rho \cdot g \cdot H, \quad (12.2)$$

де H – висота стовпця рідини або газу;
 g – прискорення сили тяжіння.

Якщо значення H взяти сталим, то тиск P однозначно визначають густиною середовища.

У густиномірах такого типу тиск стовпця рідини зазвичай вимірюють непрямым способом, за рахунок безперервного продування через рідину інертного газу (повітря), тиск якого пропорційний тиску стовпця рідини (п'єзометричні денсметри). Такий метод вимірювання тиску стовпця рідини дозволяє легко здійснити передачу показань на відстань. Характер інертного газу, що продувають, вибирають залежно від властивостей рідини, густина якої вимірюється. Витрата інертного газу, що продувають, повинна бути невеликою та сталою, оскільки коливання витрати може викликати додаткову похибку вимірювання.

Зазвичай вимірюють різницю тиску двох стовпців рідини різної висоти (диференційний метод). Це дає можливість не впливати на точність вимірювання коливань рівня досліджуваної рідини і автоматично здійснити температурну компенсацію.

У п'єзометричному диференціальному дворідинному денсиметрі з безперервною продувкою інертного газу (рис. 12.4) досліджувана рідина безперервно протікає через посудину 1, в якій підтримуються рівень незмінним. Посудина 2 незмінного рівня заповнена еталонною (порівняльною) рідиною з відомою густиною.

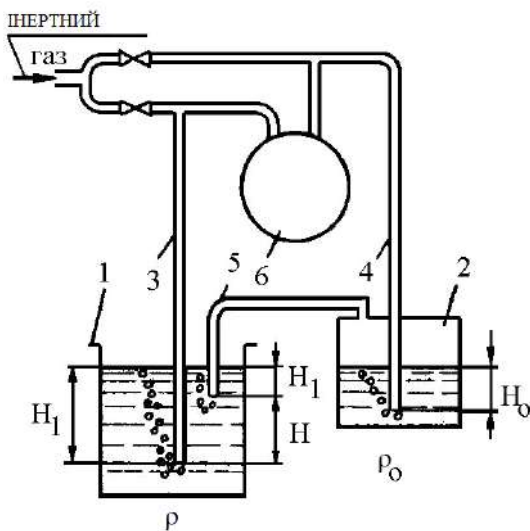


Рисунок 12.4 – Схема п'єзометричного диференціального денсиметра з безперервним продуванням газу:

- 1 – посудина для досліджуваної рідини;
- 2 – посудина з еталонною рідиною;
- 3, 4, 5 – трубки; 6 – дифманометр

Інертний газ по трубці 3 рухається крізь шар досліджуваної рідини незмінної висоти і далі виходить із приладу. Такий самий інертний газ по трубці 4 проходить крізь шар незмінної висоти еталонної рідини, потім по додатковій трубці 5 газ проходить крізь невеликий шар досліджуваної рідини і далі йде з приладу. Проходження газу з додаткової трубки через невеликий шар досліджуваної рідини забезпечує незалежність показань денсиметра від коливання рівня рідини в посудині 1.

За відомих глибин занурення п'єзометричних трубок і відомої густини еталонної рідини ρ_0 показання диференціального манометра δ є мірою густини ρ досліджуваної рідини.

Еталонну рідину підбирають за густиною, що дорівнює найменшій густині досліджуваної рідини.

В існуючих приладах посудина 2 з еталонною рідиною знаходиться в посудині 1 (в досліджуваній рідині). За однакових температурних коефіцієнтах еталонної і досліджуваної рідини та рівності їх температур автоматично забезпечується температурна компенсація.

12.2.4 Радіоізотопні денсиметри

Основною перевагою радіоізотопних денсиметрів є безконтактність вимірювання. Це полегшує вимірювання густини агресивних або дуже в'язких рідин, а також рідин, що перебувають при високих температурах і тисках. У цих денсиметрах використовують переважно γ -випромінювання.

Вимірювання густини в них засноване на визначенні змін в інтенсивності прямого пучка γ -променів після проходження їх крізь вимірюване середовище.

На рисунку 12.5 наведена принципова блок-схема радіоізотопного густиноміра компенсаційного типу.

У технологічному трубопроводі встановлено джерело радіоактивного випромінювання 1 (C^{60} , Cs^{136}) і приймач випромінювання 3. γ -промені від джерела проходять крізь стінки об'єкта вимірювання, шар рідини і потрапляють у приймач випромінювання. Електричний сигнал приймача, який є функцією вимірюваної густини, формують блоком 4 і далі передають на вхід електронного перетворювача 5, куди надходить також сигнал від додаткового пристрою. Останній містить радіоактивне джерело випромінювання 6, металевий компенсаційний клин 7, приймач випромінювання 8 і блок, що формує, 9. Джерело і приймач випромінювання додаткового пристрою такі самі, як 1 і 3.

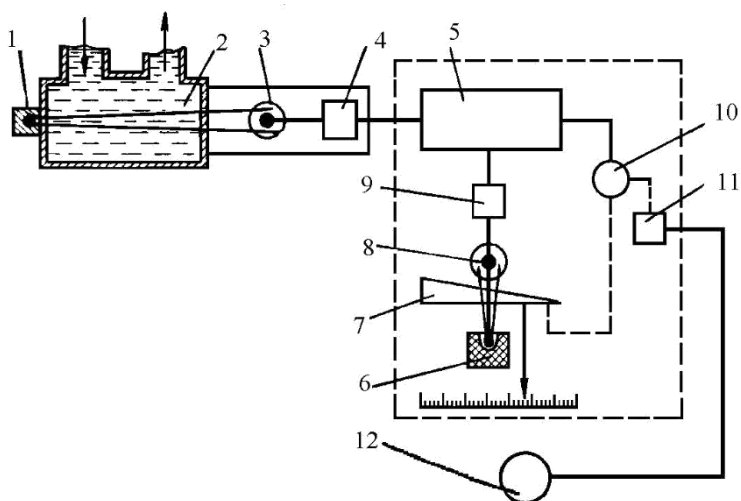


Рисунок 12.5 – Блок-схема радіоізотопного денсиметра компенсаційного типу:

- 1 і 6 – джерела випромінювання; 2 – об'єкт вимірювання;
- 3 і 8 – приймачі випромінювання;
- 4 і 9 – блоки, що формують;
- 5 – електронний перетворювач; 7 – компенсаційний клин;
- 10 – реверсивний двигун;
- 11 – диференційно-трансформаторний перетворювач;
- 12 – вторинний прилад

Різницю сигналів підсилюють в електронному перетворювачі й подають на реверсивний електродвигун 10, який пов'язаний з компенсаційним металевим клином 7 і плунжером диференційно-трансформаторного перетворювача 11. Залежно від величини і знака сигналу в електронному перетворювачі реверсивний двигун переміщує металевий клин доти, поки різниця сигналів дорівнюватиме нулю. Величина переміщення клину, з яким пов'язана стрілка диференційно-трансформаторного приладу 12, що показує, пропорційна зміні густини рідини.

12.3 Засоби вимірювання в'язкості рідин

В'язкість (внутрішнє тертя) – властивість рідких тіл (рідин і газів) чинити опір зміщенню шарів. Основний закон в'язкого потоку описують формулою Ньютона:

$$F_{\text{тертя}} = \mu \cdot S \cdot \frac{dv}{dx}, \quad (12.3)$$

де $F_{\text{тертя}}$ – сила внутрішнього тертя між шарами, що рухаються;

μ – коефіцієнт внутрішнього тертя (динамічна в'язкість);

S – площа поверхні дотичних шарів;

dv/dx – градієнт відносної швидкості двох шарів рідини.

Динамічна в'язкість μ характеризує опір рідини (газу) зсуву її шарів. Величину, зворотну динамічній в'язкості $\varphi = 1/\mu$, називають *текучістю*. Поряд із поняттям динамічної в'язкості μ використовують поняття *кінематичної в'язкості* ν :

$$\nu = \mu/\rho. \quad (12.4)$$

Одиниця динамічної в'язкості в SI – Па · с, у системі СГС – П (пуаз); одиниця кінематичної в'язкості в SI – м²/с, у системі СГС – Ст (стокс). Співвідношення між названими одиницями 1 П = 10⁻¹ Па·с; 1 ст = 10⁻⁴ м²/с.

В'язкість рідин зі збільшенням температури зменшується, а газів – збільшується. Динамічна в'язкість до тисків 20 МПа практично не залежить від тиску. В'язкість у загальному випадку не є адитивною фізичною властивістю.

Засоби вимірювання в'язкості називають *віскозиметрами*. У хіміко-технологічних процесах віскозиметри використовують лише для вимірювання в'язкості рідин. Існують такі автоматичні віскозиметри: капілярні, ротаційні, вібраційні, віскозиметри з падаючим тілом тощо.

12.3.1 Капілярні віскозиметри (віскозиметри витікання)

Переважає більшість капілярних віскозиметрів – лабораторні прилади. Принцип дії таких віскозиметрів відповідає закономірності протікання рідини через капіляр, що описують законом Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \mu \cdot l} (P_1 - P_2), \quad (12.5)$$

де Q – об’ємна витрата рідини;

μ – динамічна в’язкість;

d, l – внутрішній діаметр і довжина капіляра;

P_1, P_2 – тиск до і після капіляра за потоком.

Із формули (12.5) бачимо, що для вимірювання динамічної в’язкості μ за незмінної об’ємної витрати Q рідини досить виміряти перепад тиску $P_1 - P_2$ на капілярі.

На рисунку 12.6 наведена принципова схема автоматичного капілярного віскозиметра.

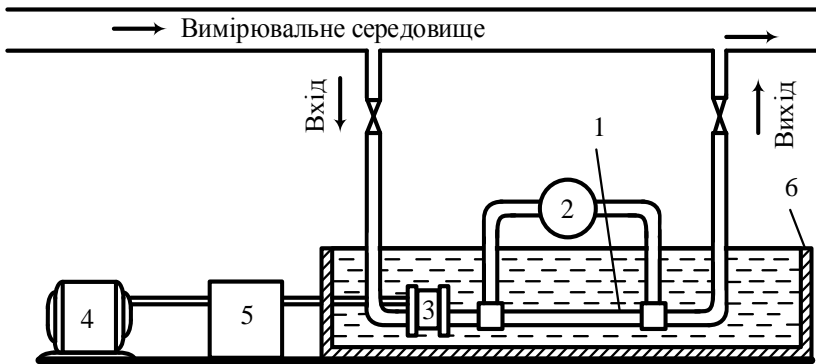


Рисунок 12.6 – Принципова схема автоматичного капілярного віскозиметра:

1 – капілярна трубка; 2 – дифманометр;

3 – шестеренний насос; 4 – синхронний двигун;

5 – редуктор; 6 – масляний термостат

В'язкість визначають за перепадом тиску на кінцях капілярної трубки 1, через яку прокачують контрольовану рідину. Перепад тиску заміряють чутливим дифманометром 2, шкала якого градуйована в одиницях динамічної в'язкості. Діаметр і довжина капілярної трубки вибирають залежно від бажаних меж вимірювання в'язкості. Для створення постійної об'ємної витрати Q аналізованої рідини використовують шестеренний насос 3, який приводиться у рух синхронним двигуном 4 із редуктором 5. Віскозиметр встановлений у масляному термостаті 6, що має сталу температуру.

Похибка капілярних віскозиметрів становить $\pm 2\%$ від верхньої межі шкали і визначається в основному точністю підтримки температури вимірюваного середовища і витрати.

12.3.2 Віскозиметри з падаючим тілом (кулькові віскозиметри)

Принцип дії цих механічних віскозиметрів побудований на вимірюванні швидкості (або часу) руху тіла (кульки) під дією сил ваги і тертя в аналізованій рідині. Цей рух описує закон Стокса:

$$v = 0,22 \cdot \frac{g \cdot (\rho_k - \rho) \cdot r^2}{\mu}, \quad (12.6)$$

де v – швидкість рівномірного падіння кульки;

μ – динамічна в'язкість;

ρ – густина вимірюваної рідини;

ρ_k – густина матеріалу кульки ($\rho_k > \rho$);

r – радіус кульки.

Зазвичай вимірювання швидкості v зводять до вимірювання відрізка часу τ , за який кулька, що падає зі сталою швидкістю, проходить певний незмінний відрізок шляху l між двома взятими позначками, тобто

$$\tau = \frac{l}{v}. \quad (12.7)$$

На рисунку 12.7 показана схема кулькового віскозиметра циклічної дії. Аналізовану рідину з резервуара 3 або трубопроводу прокачують насосом 2 по мірній трубці 4 з немагнітного матеріалу знизу нагору і при своєму русі піднімає кульку 1 від нижньої 5 до верхньої 6 обмежувальної сітки. Кулька, перебуваючи в неробочому положенні у нижній обмежувальній сітці 5, під час ввімкнення насоса піднімається і зупиняється у верхній обмежувальній сітці 6. У момент дотику кульки з сіткою 6 насос автоматично вимикається, і кулька падає в нерухомому середовищі.

Вимірювання в'язкості зводиться до відліку часу, впродовж якого кулька проходить фіксовану ділянку шляху. На мірну трубу 4 встановлені котушки 10 і 11, первинні й вторинні обмотки яких з'єднані за диференційно-трансформаторною схемою. Під час проходження кульки через котушки на виході вимірювальної схеми виникає сигнал розбалансу, який підсилюють електронним підсилювачем 7. Під час дотику кульки до нижньої обмежувальної сітки 5 ввімкнеться насос 2 і процес повториться.

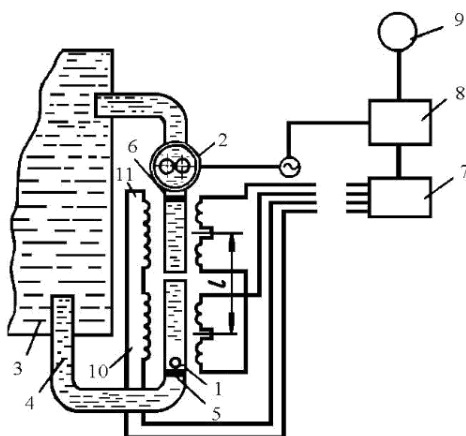


Рисунок 12.7 – Принципова схема автоматичного віскозиметра дискретної дії з падаючою кулькою:

- 1 – кулька; 2 – шестеренний насос; 3 – резервуар;
- 4 – мірна трубка; 5 і 6 – обмежувальні сітки;
- 7 – електронний підсилювач; 8 – реле; 9 – вторинний прилад; 10 і 11 – котушки

Автоматичне ввімкнення шестеренного насоса і автоматичний відлік часу падіння кульки здійснює релейний блок 8 і вторинний прилад 9. Вторинний прилад може бути автоматичним із диференційно-трансформаторною схемою або ним може бути електричний секундомір.

Межі вимірювання віскозиметра можна змінювати в широкому діапазоні за рахунок регулювання відстаней між котушками і підбору розміру кульки.

Клас точності віскозиметра становить 2,0. Віскозиметри з падаючою кулькою в конструктивному відношенні удосконалюють у напрямку підвищення точності вимірювання завдяки застосуванню електромагнітних, оптичних і радіоізотопних методів фіксації часу руху кульки у випробовуваній рідині.

12.3.3 Ротаційні віскозиметри

Принцип дії цих механічних віскозиметрів побудований на вимірюванні обертального моменту M , який виникає на осі ротора (циліндра, диска тощо), зануреного у вимірювальне середовище, під час взаємного їх переміщення. Зазначений обертальний момент M у загальному випадку описують таким виразом:

$$M = k \cdot \omega \cdot \mu, \quad (12.8)$$

де k – сталий коефіцієнт, що залежить від конструкції ротора віскозиметра;

ω – кутова швидкість обертання ротора;

μ – динамічна в'язкість.

Із формули (12.8) бачимо, що при сталій кутовій швидкості ω обертальний момент M однозначно визначає в'язкість рідини μ .

Обертальний момент можна виміряти різними способами:

1) визначенням сили струму, яку споживає електродвигун приводу обертового тіла;

2) визначенням кута повороту пружної підвіски або пружини, що врівноважує.

У першому способі зазвичай використовують однофазові синхронні двигуни або двигуни постійного струму з автоматичним регулюванням кількості обертів. Струм, споживаний приводом електродвигуна, змінюється залежно від в'язкості рідини, причому для різних тіл, що обертаються, ця залежність різна (за сталої швидкості обертання двигуна). У цьому разі за вимірювальний (вторинний) прилад зазвичай використовують автоматичний потенціометр.

У другому способі у приладах момент в'язкісного опору врівноважується пружним моментом підвіски або пружини, кут повороту яких пропорційний обертальному моменту M . Іноді для передачі руху застосовують магнітну муфту, зміщення якої є мірою в'язкості. Приводом обертового тіла є синхронний двигун.

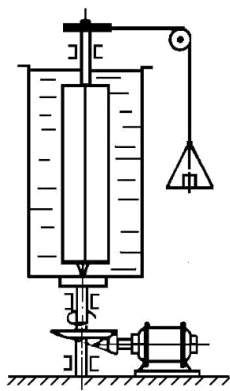


Рисунок 12.8 – Схема вискозиметра з коаксіальними циліндрами

У ротаційних вискозиметрах з двома коаксіальними циліндрами (рис. 12.8) простір між ними заповнюють досліджуваною рідиною. Під час обертання зовнішнього циліндра зі сталою кутовою швидкістю рідина прагне передати обертання внутрішньому циліндру. Для збереження внутрішнього циліндра в стані спокою до нього прикладений момент, однаковий і протилежний за знаком моменту, який передає рідина, у вигляді вантажа на ваговій платформі.

Обертальний момент дорівнює добутку сили тяжіння врівноважувального вантажу на радіус шківів, до якого прикріплена нитка, що підтримує вагову платформу.

У ротаційних вискозиметрах використовують й інші методи вимірювання моменту на осі веденого циліндра:

– за силою струму, яка живить двигун, що приводить в обертання циліндр;

– за кутом зсуву між полюсами статора і ротора синхронного двигуна, що обертає циліндр;

– за кутом закручування гнучкої нитки або пружини тощо.

Характерною особливістю ротаційних віскозиметрів є доволі широкий діапазон вимірювань від $0,01 \text{ Па} \cdot \text{с}$ до $1\,000 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Класи точності ротаційних віскозиметрів становлять 1–2,5.

12.3.4 Вібраційні віскозиметри

Вібраційні віскозиметри дозволяють оцінювати в'язкість за зміною амплітуди коливань пластини. Цю зміну амплітуди фіксують і за величиною часу загасання коливань роблять висновки про в'язкість рідини.

Найчастіше використовують коливання ультразвукової частоти 23–28 кГц (ультразвукові віскозиметри).

На рисунку 12.9 показана блок-схема ультразвукового віскозиметра, що вимірює інтенсивність загасання ультразвукових коливань.

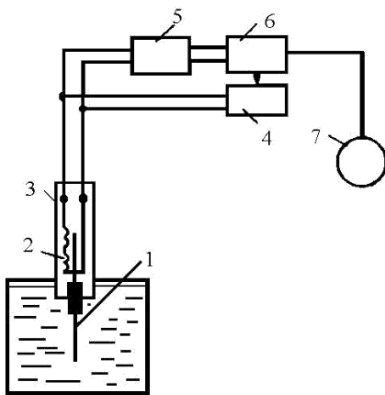


Рисунок 12.9 – Блок-схема ультразвукового віскозиметра:

- 1 – пластина; 2 – котушка збудження; 3 – гільза;
- 4 – генератор імпульсів; 5 – підсилювач;
- 6 – детектор з тригером на виході;
- 7 – вимірювальний прилад

Пластина 1 з магніострикційного матеріалу закріплена в торці гільзи 3. Нижня половина пластини розміщена в рідині, в'язкість якої вимірюють. У гільзі є збуджувальна котушка 2, яку живлять від генератора імпульсів 4. На котушку подають імпульс струму тривалістю близькою до 20 мкс, внаслідок чого в пластині виникають поздовжні коливання (магнітопружна деформація), потім збудження знімають і пластина здійснює загасаючі коливання. Частоту коливань визначає геометрія пластини, а амплітуду загасання – в'язкість рідини.

Під час коливання пластини завдяки зворотному магніострикційному ефекту в котушці наводиться деяка ЕРС, що має частоту коливань пластини. Цю ЕРС підсилюють і передають на детектор із тригером, який відключає генератор імпульсів до моменту завершення коливань пластини (зменшення амплітуди до 0,002 від початкової величини), після чого генератор імпульсів знову збуджується. Отже, мірою інтенсивності згасання є величина інтервалів часу між послідовним збудженням генератора імпульсів. Чим більша в'язкість рідини, тим менші інтервали між імпульсами. Вимірювальний прилад, градуйований в одиницях в'язкості, вимірює середню величину інтервалу імпульсів.

Ультразвукові віскозиметри можуть бути використані для неперервного контролю різних рідин у технологічних потоках. Діапазон вимірювання цих віскозиметрів від 0,0001 Па · с до 100 Па · с. Відносна похибка приладу становить $\pm 1\%$.

12.4 Вологоміри для газів і твердих тіл

Для автоматичного визначення вологості газів найчастіше використовують психрометричний метод і метод точки роси.

Для визначення вологості твердих тіл зазвичай застосовують непрямі методи, що дозволяють визначати вологість завдяки вимірювання функціонально пов'язаної з нею фізичної величини. З непрямих методів для автоматичного безперервного вимірювання вологості найбільшого поширення

набули кондуктометричний метод і метод діелектричної проникності.

12.4.1 Психрометричний метод

Швидкість випаровування вологи залежить від відносної вологості повітря. Випаровування вологи, в свою чергу, викликає охолодження конденсованої рідини. Таким чином, за різницею температур повітря і вологого об'єкта можна визначити швидкість випаровування, а значить, і вологість повітря.

Психрометр має два однакових термометри, з яких в одного, який називають вологим, теплоприймаюча частина весь час залишається вологою, стикаючись з гігроскопічним тілом, що поглинає воду з посудини.

Під час випаровування вологи із зволоженої поверхні вологого термометра температура його знижується. В результаті створюється різниця температур вологого (t_v) і сухого (t_c) термометрів, яку називають *психрометричною різницею* ($t_c - t_v$).

Відносну вологість φ , що залежить від психрометричної різниці $t_c - t_v$, виражають таким рівнянням:

$$\varphi = \frac{p_v - A \cdot (t_c - t_v)}{p_c}, \quad (12.9)$$

де p_v – пружність (тиск) парів, що насичують випробовуване середовище за температури t_v , вологого термометра;

p_c – пружність парів, що насичують випробовуване середовище за температури t_c , сухого термометра;

A – психрометричний коефіцієнт, що залежить від конструкції психрометра, швидкості обдування вологого термометра газом і тиску газу.

Коефіцієнт A визначають за психрометричними таблицями, складеним для певних конструкцій психрометрів. Найбільший вплив на величину A має швидкість обдування вологого термометра газом. Зі зростанням швидкості газового потоку коефіцієнт A швидко зменшується і під час швидкостей більших ніж 2,5–3 м/с практично залишається незмінним. У перетворювачах промислових психрометрів передбачають

пристрої, що забезпечують сталу швидкість газового потоку не нижчу ніж 3–4 м/с.

У перетворювачах електричних психрометрів для визначення температур зазвичай застосовують металеві термометри опору. На рисунку 12.10 наведена принципова схема електричного психрометра. Вимірювальна частина приладу складається з двох мостів I та II. Обидва мости живлять змінним струмом від обмотки силового трансформатора електронного підсилювача ЕП. Ці мости мають два спільних плечі R_1 і R_3 . Плече R_2 підключене до моста I, плече R_4 – до моста II. Сухий термометр опору R_{mc} підключений в плече моста I, вологий термометр опору R_{mv} – в плече моста II.

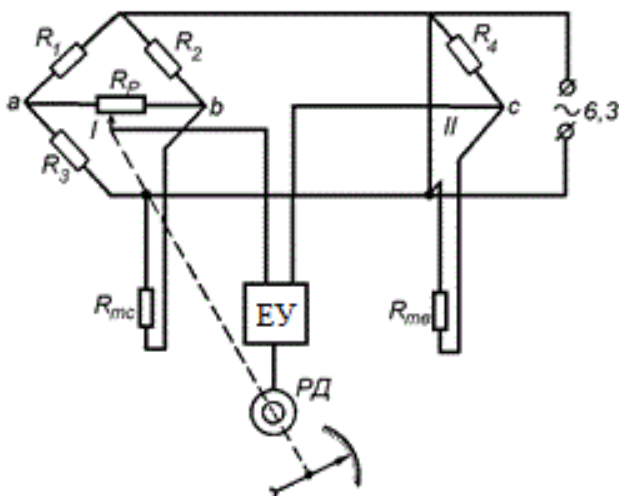


Рисунок 12.10 – Схема електричного психрометра

Різниця потенціалів на вершинах a і b діагоналі моста I пропорційна температурі сухого термометра опору R_{mc} , а різниця потенціалів на вершинах a і c – температурі вологого термометра опору R_{mv} .

Падіння напруги між точками b і c діагоналі подвійного моста пропорційне різниці температур $t_c - t_g$ сухого і вологого термометрів опору. Рівновагу вимірювальної схеми встановлюють автоматично зміною положення пересувача реохорда R_p , що приводиться в рух реверсивним двигуном РД. Одночасно двигун переставляє стрілку приладу.

Перевагами психрометричного методу є задовільна точність за позитивних температур і незначна інерційність. Недоліки – залежність результатів вимірювання від швидкості руху газів і коливань атмосферного тиску, а також зниження чутливості та зростання похибки вимірювань зі зниженням температури.

12.4.2 Метод точки роси

Під час цього методу випробуваний газ охолоджують до настання насичення, тобто до точки роси. Методом точки роси можна вимірювати вологість газу за будь-яких тисків.

За незмінного тиску точка роси не залежить від температури досліджуваного газу. Для визначення моменту настання точки роси зазвичай використовують охолоджуване металеве дзеркало, температуру якого в момент випадання конденсату на ньому фіксують за точку роси. Робоча поверхня дзеркала повинна бути знежирена. За наявності в досліджуваному газі пилу, масел, важких вуглеводів та інших забруднень необхідно передбачати автоматичне очищення поверхні дзеркала перед кожним вимірюванням.

В автоматичних приладах появу точки роси на дзеркальній поверхні визначають за ослабленням світлового потоку, відбитого від дзеркала і сприйнятого приймачем.

На рисунку 12.11 показана принципова схема автоматичного гігрометра за точкою роси з використанням дзеркала і фотоелемента. Дзеркалом є відполірована торцева поверхня порожнистого циліндра 1 з нержавіючої сталі, що міститься в середовищі газу, вологість якого вимірюють. Внутрішню порожнину циліндра охолоджують безперервно

рідиною, що тече. Температуру охолоджувальної рідини регулюють електричним нагрівачем 2, керованим електромагнітним реле 3, по обмотці якого проходить фотострум фотоелемента Φ . Фотоелемент освітлює відбитий від дзеркальної поверхні циліндра світловий потік лампи розжарювання 4.

Температуру поверхні циліндра (точка роси) вимірюють термометром опору T . Вторинним приладом є записуючий логометр або мілівольтметр з дужкою, що падає. Реле 5, що керує роботою дужки, яка падає, керується іншим електромагнітним реле 3. Робота обох реле синхронізована таким чином, що стрілку вторинного приладу притискає падаюча дужка в ті моменти часу, коли на стінках циліндра (дзеркалі) з'являється туман, тобто, коли стінки циліндра (дзеркала) охолоджують до точки роси.

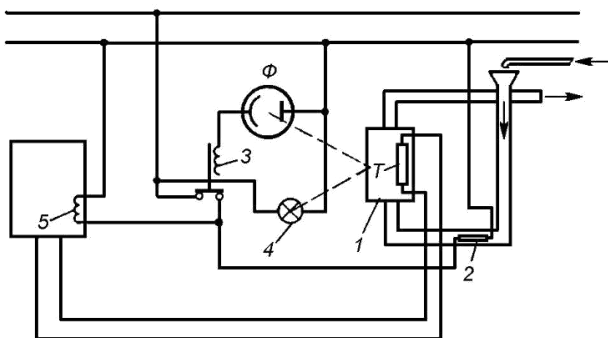


Рисунок 12.11 – Схема автоматичного гігрометра за точкою роси:

- 1 – порожнистий циліндр; 2 – електричний нагрівач;
3 і 5 – реле; 4 – лампа розжарювання

Водночас внаслідок конденсації на поверхні дзеркала туману світловий потік, що падає на фотоелемент, зменшується і завдяки зменшенню фотоструму, спрацьовує реле 3, замикаючи ланцюг електрообігрівача 2. Охолоджуючу рідину нагрівають до температури, вищої за точку роси, туман на дзеркалі зникає, фотострум зростає і реле 3 знову вмикає електрообігрівач. Отже, температура дзеркальної поверхні циліндра весь час коливається близько точки роси.

Для визначення вологості твердих матеріалів застосовують кондуктометричний метод і метод діелектричної проникності.

12.4.3 Кондуктометричний метод

Цей метод заснований на залежності електричних властивостей матеріалів від їх вмісту води.

Перетворювачі кондуктометричних вологомірів являють собою два електроди, конструктивно виконаних у вигляді плоских пластин, циліндричних трубок, роликів тощо.

Із вимірювальних схем найбільшого поширення набули мостові схеми.

Цей метод визначення вологості заснований на залежності електричного опору капілярно-пористих матеріалів від вологості.

Вологовмістні матеріали, які в сухому вигляді є діелектриками, під час зволоження стають напівпровідниками. Їх питомий опір змінюється залежно від води в надзвичайно широкому діапазоні, що охоплює 3–7 порядків. Такий широкий



Рисунок 12.12 –
Зовнішній вигляд
кондуктометричного
датчика для
визначення
вологості ґрунту

діапазон може негативно позначитись на точності даних вологомірів при малих значеннях вологості, коли електричний опір дуже великий і зовнішні фактори вносять значну похибку у результати вимірювань.

На рисунку 12.12 наведений зовнішній вигляд кондуктометричного датчика вологості на базі чипа LM393, який призначений для роботи спільно з апаратною платформою контролера ARDUINO. Такий датчик має дискретний та аналоговий виходи.

12.4.4 Метод діелектричної проникності (діелькометричний метод)

Більшість капілярно-пористих тіл мають діелектричну проникність $\varepsilon = 1\text{--}6$ (для води $\varepsilon = 81$). Тому наявність вологи в твердому матеріалі значно впливає на величину діелектричної проникності.

Визначення величини діелектричної проникності зазвичай зводять до вимірювання ємності конденсатора. Перетворювачі ємнісних вологомірів виконують у вигляді двох плоских пластин або двох концентричних циліндрів, простір між якими заповнюють досліджуванним матеріалом.

Для більшості матеріалів абсолютна величина ємності становить кілька пікофарад. Для вимірювання такої невеликої ємності з достатньою точністю зазвичай застосовують високочастотні резонансні вимірювальні схеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Контроль та вимірювання параметрів рідин і газів» / укладачі: С. С. Антоненко, Е. В. Колісніченко. – Суми : Сумський державний університет, 2009. – 199 с.

2. Бельдеева Л. Н. Технологические измерения на предприятиях химической промышленности. / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. – 73 с.

3. Бельдеева Л. Н. Технологические измерения на предприятиях химической промышленности / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. – Ч. 2. – 76 с.

ДОДАТОК А (обов'язковий) Термінологія вимірювання

Вимірювання – визначення значення фізичної величини дослідним методом за допомогою спеціальних технічних засобів.

Міра (еталон) – засіб вимірювання, що забезпечує зберігання і відтворення одиниці вимірювання.

Первинний еталон – державний еталон.

Вторинний еталон – еталон, значення якого встановлюють за первинним для метрологічних служб.

Робочий еталон – еталон, який використовують у вимірюваннях.

Засоби вимірювання – технічні засоби, які використовують під час вимірювань, і вони атестовані державною метрологічною службою.

Вимірювальний прилад – технічний засіб, зазвичай, що не є мірою, який використовують для порівняння відомої величини і величини, яку визначають.

Точність – величина, зворотна відносній похибці.

Однократне вимірювання дає єдиний результат, що беруть за остаточний результат вимірювання шуканої величини. Однократне вимірювання є достатнім у двох випадках. По-перше, під час використання малочутливого вимірювального приладу, коли всі вимірювання призводять до однакових результатів. По-друге, під час вимірювань фізичної величини, що змінюється.

Багаторазові вимірювання виконують методом повторення однократних вимірювань однієї і тієї самої постійної фізичної величини, це призводить до одержання набору даних. Остаточний результат багаторазового вимірювання, зазвичай, знаходять із набору даних у вигляді середнього арифметичного результату всіх окремих вимірювань. Вимірювання, проведені в науці і техніці, зазвичай прагнуть виконати як багаторазові, щоб забезпечити підвищення точності результатів вимірювання шуканих величин.

Вимірювальні фізичні величини поділяють на такі основні типи:

Випадкова величина – така фізична величина, що пов'язана з випадковими процесами, тому результат окремого вимірювання не може бути однозначно передбачений заздалегідь. Водночас проведення досить великої кількості вимірювань випадкової величини дозволяє встановити, що результати вимірювання відповідають певним статистичним закономірностям.

Стала величина – фізичні сталі, наприклад, швидкість світла у вакуумі, заряд електрона, постійна Боцмана тощо. Можна вважати сталими величинами також певні фізичні характеристики конкретного об'єкта, що за фіксованих умов. Стала величина найчастіше проявляє себе як випадкова величина, а результати її вимірювання розкривають випадкову природу впливів і відповідають певним статистичним закономірностям.

Змінна величина – така величина закономірно змінюється із часом унаслідок процесів, що проходять у досліджуваному об'єкті. Вимірювання, проведені в різні моменти часу, фіксують величину в нових умовах. Набір результатів однократних вимірювань являє собою результати принципово неповторних вимірювань, тому що час не можна повернути назад, а вимірювання у цілому не може розцінюватися як багаторазове.

Нестабільна величина – безсистемна величина, тобто під час відсутності яких би то не було статистичних закономірностей змінюється, «пливе» або «дрейфує» із часом. До основної характеристики нестабільної величини варто віднести відсутність у експериментаторів інформації про її залежності від часу. Вимірювання такої величини дає набір даних, що не мають ніяких корисних відомостей.

ДОДАТОК Б
(обов'язковий)
Методика обробки результатів вимірювань

Б.1 Визначення дисперсії та середньоквадратичної похибки

Випадкові похибки піддають строгому математичному опису, що дозволяє робити висновки про якість вимірювань, в яких вони наявні. Похибки інших типів більш складні для аналізу, їх виявляють і аналізують лише в умовах конкретного експерименту. Для одного вимірювання випадкові похибки не враховують, однак для ряду повторних вимірювань однієї і тієї самої постійної величини, проведених з однаковою старанністю, їх вплив на одержаний результат після виключення систематичних і грубих похибок можна оцінити з певною ймовірністю.

Теорія випадкових похибок, заснована на методах теорії ймовірностей і математичної статистики, дозволяє під час проведення певної кількості повторних вимірювань уточнити кінцевий результат. Унаслідок цього теорію випадкових похибок широко використовують для оцінювання точності вимірювань і надійності роботи вимірювальних приладів.

Нехай величина X виміряна n разів. Тоді відповідно до теорії ймовірності найбільш імовірне значення вимірюваної величини дорівнює її середньому вимірювальному значенню при нескінченно великому n , тобто

$$\bar{x}_{\text{вим}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (\text{Б.1})$$

де x_i – результат i -го вимірювання ($i = 1, 2, \dots, n$)

Умова, в якій $x \rightarrow X$ при $n \rightarrow \infty$, правильна лише в тому ідеальному разі, коли систематичні похибки повністю вимкнені. Якщо кількість n вимірювань обмежена, то найбільш близьким до цього значення є *середнє арифметичне значення*:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (\text{Б.2})$$

Середнє значення \bar{x} вимірюваної величини x показує центр розподілу, біля якого групуються результати окремих вимірювань.

Абсолютна похибка i -го вимірювання

$$\Delta x_i = |\bar{x} - x_i|. \quad (\text{Б.3})$$

Дисперсію σ^2 вводять як середній квадрат відхилення окремих результатів від середнього значення випадкової величини:

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (\text{Б.4})$$

Основною характеристикою випадкової похибки є середня квадратична похибка σ . Необхідно чітко розрізняти середню квадратичну похибку σ для одиничного (окремого) вимірювання і середню квадратичну похибку σ_x для середнього значення \bar{x} .

Середню квадратичну похибку одиничного вимірювання обчислюють за результатами n вимірювань x_1, x_2, \dots, x_n , тобто визначають як квадратний корінь із дисперсії

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (\text{Б.5})$$

Як наслідок, зі способу обчислення ця величина характеризує розподілення результатів окремих вимірювань навколо середнього значення, одержуваного після оброблення всіх даних багаторазового вимірювання. Значення σ є основною

характеристикою для визначення точності цього способу вимірювань. Хоча величина σ характеризує випадкову похибку результату одного вимірювання, виконаного цим методом, сама вона може бути визначена лише з результатів досить великої кількості вимірювань і тим точніше, чим більше n (на практиці можна обмежитися значенням $n = (10-50)$). При кінцевих n правильніше використати термін *експериментальна оцінка*, що так само відносять і до середнього значення σ , і до дисперсії σ^2 .

Зі збільшенням кількості n вимірювань середньоквадратична похибка σ зменшується. Через обмеження кількості n вимірювань σ збігається з випадковою похибкою лише з певною ймовірністю, так названою довірчою ймовірністю p , тому результат вимірювань величини x подають у вигляді

$$x = \bar{x} \pm \alpha_{n,p} \cdot \sigma , \quad (\text{Б.6})$$

де $\alpha_{n,p}$ – коефіцієнт Стюдента, залежить як від кількості n вимірювань, так і від заданої випробувачем довірчої ймовірності p .

Для попереднього оцінювання ступеня ймовірності окремого ряду вимірювань, крім середнього квадратичного відхилення, застосовують також *імовірну похибку* $\Delta_{\text{ім}}$:

$$\Delta_{\text{ім}} = 0,675 \cdot \sigma . \quad (\text{Б.7})$$

Б.2 Графічна характеристика похибок

Вивчення закономірностей, яким підпорядковуються випадкові похибки, можна зробити наочними, якщо побудувати діаграму, що показує, як часто одержують ті або інші результати вимірювання. Таку діаграму називають *гістограмою розподілу результатів вимірювання*.

Гістограма – східчаста діаграма, що показує, як часто під час вимірювань виникають результати, що потрапили у той або інший інтервал Δx між найменшим x_{\min} і найбільшим x_{\max} з обмірюваних значень величини x . Гістограму будують у таких координатах: по осі абсцис відкладають вимірювану величину x , по осі ординат – $\frac{\Delta n}{n} \cdot \Delta x$ (рис. Б.1).

Тут n – повна кількість проведених вимірювань, Δn – кількість результатів, що потрапили в інтервал $[x, x \pm \Delta x]$.

Відношення $\frac{\Delta n}{n}$ є часткою результатів, що потрапили в зазначений інтервал. Воно має сенс імовірності потрапляння результату окремого вимірювання в

цей інтервал. Вираз $\frac{\Delta n}{n} \cdot \Delta x$, одержаний після ділення $\frac{\Delta n}{n}$ на ширину інтервалу Δx , набуває сенсу щільності ймовірності.

За дуже великої кількості вимірювань ($n \rightarrow \infty$) весь діапазон зміни величини x можна розбити на нескінченно малі інтервали Δx , як це роблять у математиці, і знайти кількість результатів Δn у кожному з них. У цьому разі гістограма перетвориться в плавну криву – графік функції

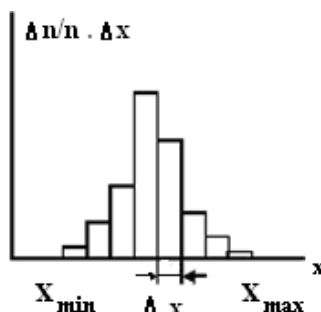


Рисунок Б.1 – Гістограма

$$\rho(x) = \frac{dn}{n \cdot dx} = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \Delta x \rightarrow 0}} \frac{\Delta n}{n \cdot \Delta x}. \quad (\text{Б.8})$$

Таку функцію називають *щільністю ймовірності*, або *розподілом ймовірності*, іноді – просто розподілом величини x . Розподілом є залишкова характеристика випадкової величини. Закон розподілу можна задати у вигляді функціонального виразу, графіка, таблиці або іншим способом. За будь-якого варіанта

задання встановлюють зв'язок між імовірністю того, що результат однократного вимірювання випадкової величини потрапить у заданий інтервал можливих значень і шириною цього інтервалу.

Розподіл містить найбільш повну інформацію про випадкову величину, однак користуватися ним не завжди зручно. Оперуючи результатами проведеного експерименту, замість функції розподілу краще мати звичні числові величини – ними є середнє значення і дисперсія.

На рисунку Б.2 наведені гістограми, побудовані для різної кількості n вимірювань. На гістограмі (рис. Б.2 а) для $n = 5$ тільки-но визначається картина розсіювання результатів; на гістограмі (рис. Б.2 б) для $n = 50$ уже проявляється певна закономірність, що стає ще більш виразною на рисунку Б.2 в для $n = 300$.

Гістограми, побудовані за великої кількості вимірювань, дозволяють вивчити закономірності, властиві випадковим похибкам. Гістограма на рисунку Б.2 в практично симетрична, має вигляд дзвону, положення її максимуму близьке до X . Це означає, що випадкові похибки приблизно з однаковою частотою набувають як позитивних, так і негативних значень; більші похибки трапляються рідше, ніж менші.

Ширина гістограми, що практично не залежить від кількості вимірювань, характеризує зону розсіювання результатів вимірювань, тобто випадкові похибки одиничних (окремих) вимірювань. Вона залежить від приладів, методів і умов вимірювань. Це бачимо з порівняння з гістограмою на рисунку Б.3, отриманої за тих самих вимірювань іншим, більш

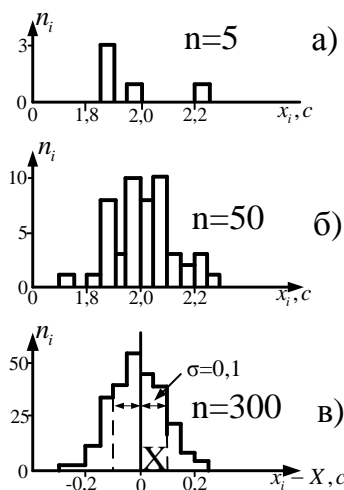


Рисунок Б.2 – Гістограми результатів проведених вимірювань

удосконаленим методом. Гістограма (рис. Б.3) також має вигляд дзвону, але ширина її в 5 разів менша, ніж на рисунку Б.2 в.

Необхідно відзначити таку важливу обставину. Гістограми розподілу результатів вимірювання, отримані під час вимірювання фізичних величин, виконаних за допомогою різноманітних приладів і методів, здебільшого дуже схожі за формою на гістограмах рисунка Б.2 в і рисунка Б.3. Вони розрізняються тільки шириною гістограми і положенням максимуму, тобто величиною X . За такого розподілу говорять, що вони підпорядковані закону Гауса (розподілу Гауса, або нормальному розподілу). У теорії похибок наводять математичний вираз для розподілу Гауса (нормального розподілу):

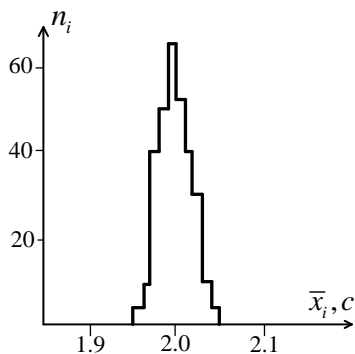


Рисунок Б.3 – Гістограма результатів проведених вимірювань удосконаленим методом

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-X)^2}{2\cdot\sigma^2}}, \quad (\text{Б.9})$$

де X – істинне значення вимірювальної величини;
 σ – середня квадратична похибка;
 σ^2 – дисперсія.

На рисунку Б.4 показані криві 1 і 2 нормального розподілу випадкових похибок, побудованих за формулою (Б.9), для двох значень середнього квадратичного відхилення σ , причому в кривій 1 це відхилення у два рази менше, ніж у кривій 2. Криві розподілу симетричні щодо осі ординат, тобто поява рівних за величиною, але протилежних за знаком випадкових похибок має однакову ймовірність, у середній частині криві утворюють опуклість, по обидва боки від якої перебувають точки перегину a і b , нижче яких криві стають вигнутими, асимптотично

наближаючись до осі абсцис. Найбільша ймовірність для обох кривих відповідає випадковій похибці $\Delta_c = 0$. Під час зростання похибки з будь-яким знаком імовірність її появи зменшується.

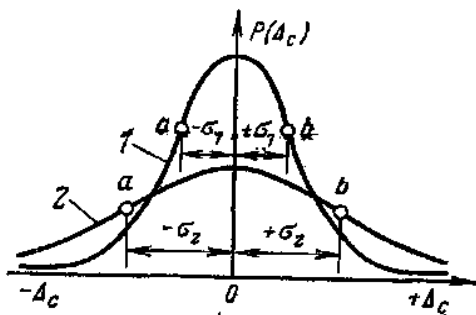


Рисунок Б.4 – Криві нормального розподілу випадкових похибок: 1 – при σ_1 ; 2 – при $\sigma_2 = 2\sigma$

Як бачимо з рисунка Б.4, криві розподілу 1 і 2 мають різні відстані між точками a і b перегину кривих. Проміжки між цими точками і віссю ординат дорівнюють середньому квадратичному відхиленню $\pm\sigma$ результату вимірювання, що характеризує ступінь розсіювання значень випадкових похибок. Чим нижче значення σ , тим менше розсіювання похибок, тому що під час цього майже вся площа під кривою розподілу розміщується поблизу осі ординат, що збільшує ймовірність появи менших і зменшує появу більших похибок. Отже, зменшення σ призводить до підвищення точності вимірювань.

Основні характеристики кривої нормального розподілу випадкових похибок наведені на рисунку Б.5. Імовірність того, що випадкові похибки не вийдуть за межі будь-якого інтервалу, визначають за площею, обмеженої кривою розподілу і цим інтервалом, відкладеним по осі абсцис. Такий інтервал $\pm\epsilon$ називають *довірчим інтервалом*, а відповідну йому ймовірність появи випадкової похибки (заштрихована площа) $\Phi(t)$ – *довірчою ймовірністю*.

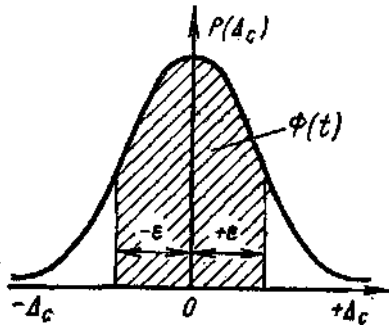


Рисунок Б.5 – Основні характеристики кривої нормального розподілу випадкових похибок

Довірчий інтервал, що характеризує ступінь відтворюваності результатів вимірювання, може мати різні значення, причому за великого довірчого інтервалу виходить і більша довірна ймовірність. Під час вимірювання може задаватися або довірчий інтервал і за ним визначатися довірна ймовірність, або, навпаки, за довірчою ймовірністю підраховуватися довірчий інтервал. Отже, для характеристики значення випадкової похибки необхідно мати дві величини – довірчий інтервал і довірчу ймовірність.

Функція $f(x)$, що називають щільністю розподілу результатів вимірювання (Б.9), має такий сенс: $f(x)dx$ є ймовірністю того, що окреме випадково обране значення багаторазово вимірюваної величини виявиться в інтервалі від x до $x+dx$. Із рисунка Б.4 бачимо, що під час зменшення σ крива нормального розподілу звужується вздовж осі Ox і витягується вздовж осі $f(x)$ ($P(\Delta_c)$). Результати вимірювання групуються навколо істинного значення X і тим щільніше, чим менше σ . Імовірність того, що результат вимірювання потрапить у довірчий інтервал $[X - \Delta x; X + \Delta x]$:

$$P = \int_{X-\Delta x}^{X+\Delta x} f(x)dx. \quad (\text{Б.10})$$

Для повноти опису випадкової похибки необхідно вміти зазначати ймовірність $P(k)$ потрапляння результату вимірювання x_i в інтервал будь-якої заданої на півширини Δx , тобто в довірчий інтервал ε ($\varepsilon = \Delta x$):

$$X - \Delta x < x_i < X + \Delta x, \quad (\text{Б.11})$$

де Δx зручно виражати через σ і певний множник k :

$$\Delta x = k \cdot \sigma. \quad (\text{Б.12})$$

У таблиці Б.1 наведені значення інтеграла (Б.10) для різних значень $\Delta x = k \cdot \sigma$, а також визначені теоретично значення $P(k)$. Імовірність $P(k)$ змінюється від 0 до 1 при зміні k від 0 до ∞ . Однак, як бачимо з таблиці Б.1, уже при $k = 2$ імовірність $P(2) = 0,95$, а при $k = 3$ маємо $P(3) = 0,997$. Імовірність 0,997 означає, що з 1 000 вимірювань у середньому 997 потраплять в інтервал від $X - 3\sigma$ до $X + 3\sigma$ і лише три вимірювання будуть мати відхилення більше 3σ . Тому з деякою часткою умовності величину $\Delta x = 3\sigma$ називають *граничною похибкою вимірювання*.

Таблиця Б.1 – Значення величини довірчої ймовірності

$k = \frac{\Delta x}{\sigma}$ або $k = \frac{\Delta \bar{x}}{\sigma_{\bar{x}}}$	Довірча ймовірність $P(k)$
1	0,68
2	0,95
2,6	0,99
3	0,997

Нерівність (Б.11) можна записати в іншому вигляді:

$$x_i - \Delta x < X < x_i + \Delta x, \quad (\text{Б.13})$$

або

$$X = x_i \pm \Delta x. \quad (\text{Б.14})$$

Цей запис має таку важливу інтерпретацію. Зробивши одне вимірювання певної величини і одержавши її значення x_i , можна стверджувати, що істинне значення величини X перебуває в інтервалі від $x_i - \Delta x$ до $x_i + \Delta x$ з імовірністю $P(k)$. Інтервал, в якому із заданою ймовірністю P перебуває істинне значення вимірюваної величини, називають довірчим інтервалом. Відповідна ймовірність P – довірча ймовірність цього інтервалу. Напівширина довірчого інтервалу є оцінкою похибки результату вимірювання. Імовірність P іноді називають *надійністю*.

Якщо в завданні вимірювання задана максимально допустима похибка вимірювання, то зменшити похибку до заданої величини можна, або збільшуючи кількість n вимірювань за незмінною довірчою імовірністю, або зменшуючи довірчу ймовірність при тій самій кількості n вимірювань, або збільшуючи n і зменшуючи P одночасно.

На практиці прийнято обирати P такою, що дорівнює 0,7 для всіх видів вимірювань. Клас точності засобу вимірювання визначають на заводі-виробнику за умови, що $P = 0,7$.

Б.3 Похибка середнього значення

Випадкову похибку можна зменшити, якщо виконати не одне, а декілька вимірювань і внаслідок вимірювання взяти середнє значення $\Delta \bar{x}$. Вивчаючи випадкові похибки одиничних вимірювань, розглядається велика сукупність однорідних вимірювань. Подібні операції виконують і у разі з середнім

значенням $\Delta\bar{x}_1$, одержавши з дослідів велику кількість різних середніх значень однієї й тієї самої вимірюваної величини. Нехай, наприклад, виконано чотири вимірювання і знайдено їхнє середнє значення $\Delta\bar{x}_1$. Виконавши ще чотири вимірювання, одержимо трохи інше $\Delta\bar{x}_2$. Зробивши таку операцію досить велику кількість разів, можна побудувати гістограму розподілу середніх значень $\Delta\bar{x}_i$.

Теорія дає такий зв'язок між середньою квадратичною похибкою середнього значення, середньою квадратичною похибкою одиничного вимірювання $\sigma_{\bar{x}}$ і кількістю вимірювань n , використаних для обчислення середнього значення $\Delta\bar{x}$:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (\text{Б.15})$$

Співвідношення (Б.15) має велике значення для теорії похибок. По-перше, з нього проглядається значна роль середньої квадратичної похибки σ , від якої залежать похибки не лише одиничного вимірювання, а й середнього значення результату. По-друге, (Б.15) являє собою закон зменшення випадкової похибки під час зростання кількості вимірювань. Наприклад, бажаючи зменшити похибку в 2 рази, ми повинні зробити замість одного чотири вимірювання; щоб зменшити похибку в 3 рази – 9 вимірювань, а 100 вимірювань зменшують похибку результату в 10 разів. Цей метод зменшення випадкової похибки часто використовують на практиці. Водночас не потрібно забувати, що формула (Б.15) справедлива лише для випадкової складової похибки вимірювань. Систематична похибка, а також значною мірою інструментальна похибка не зменшуються під час зростання кількості вимірювань.

Отже, все сказане вище про зв'язок між довірчою ймовірністю $P(k)$ і похибкою $\Delta x = k \cdot \sigma$ одиничного вимірювання

справедливо і для похибки $\Delta \bar{x}$ середнього значення. Водночас потрібно лише замінити σ на $\sigma_{\bar{x}}$.

Якщо як результат вимірювання беруть середнє \bar{x} з n вимірювань, то

$$X = \bar{x} \pm \sigma. \quad (\text{Б.16})$$

Причому напівширину довірчого інтервалу $\Delta \bar{x}$ (похибка середнього значення) для заданої довірчої ймовірності $P(k)$ можна визначити в такий спосіб.

1. Припустимо, що з великої серії певних вимірювань значення $\sigma_{\bar{x}}$ відомо; воно характеризує похибку цього методу вимірювань. Тоді для нової серії подібних вимірювань похибка середнього значення

$$\Delta \bar{x} = k \cdot \sigma_{\bar{x}} = \frac{k \cdot \sigma}{\sqrt{n}}, \quad (\text{Б.17})$$

де n – кількість виконаних вимірювань досліджуваної величини.

2. Якщо значення середньої квадратичної похибки одиничного вимірювання $\sigma_{\bar{x}}$ невідомо, але оброблювана серія вимірювань (x_1, x_2, \dots, x_n) досить велика (n більша за 10–20), то σ і $\sigma_{\bar{x}}$ знаходять із цієї серії. Тоді

$$\Delta \bar{x} = k \cdot \sigma_{\bar{x}} = \frac{k \cdot \sigma}{\sqrt{n}} = k \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (\text{Б.18})$$

У такий спосіб для характеристики випадкової похибки необхідно зазначити два числа – саму похибку, тобто напівширину довірчого інтервалу Δx або $\Delta \bar{x}$, і пов'язану з нею довірчу ймовірність P . У фізичній науковій літературі зазвичай

беруть $P = 0,68$, тобто зазначають середню квадратичну похибку σ .

Б.4. Похибка середнього значення, обумовлена малою кількістю вимірювань

На практиці часто трапляється випадок, коли виконують невелику кількість вимірювань ($n = 2-10$). Для них обчислюють середнє значення і на підставі лише цих вимірювань оцінюють похибку середнього значення $\Delta \bar{x}$. У цьому разі похибки вимірювань заздалегідь не вивчалися і значення середньої квадратичної похибки σ невідомо. Тому не можна скористатися формулою (Б.17), а формула (Б.18) для малої кількості вимірювань дає погані результати. Похибка $\Delta \bar{x}$ обчислена за (Б.18) для малої кількості вимірювань, має інше значення довірчої ймовірності. У випадку малого n правильна оцінка похибки заснована на використанні так названого розподілу Стюдента (t -розподілу).

За результатами n вимірювань ($n \geq 2$) обчислюємо середнє значення \bar{x} і напівширину довірчого інтервалу:

$$\Delta \bar{x} = t_{P,f} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (\text{Б.19})$$

Цей вираз відрізняється від (Б.18) множником перед радикалом. Замість множника k (функції довірчої ймовірності P) використовують множник $t_{P,f}$, що є функцією не лише P , а й кількості вимірювань n . Параметр f , названий числом ступенів свободи, у цьому разі відповідає $f = n-1$, де n – кількість вимірювань. Значення $t_{P,f}$, розраховані за теорією ймовірностей, наведені в таблиці Б.2.

Таблиця Б.2 – Значення коефіцієнта $t_{P,f}$

$f = n - 1$	Значення коефіцієнта $t_{P,f}$			
	$P = 0,9$	$P = 0,935$	$P = 0,95$	$P = 0,957$
1	6,31	12,71	63,66	636,6
2	2,92	4,3	9,93	31,6
3	2,35	3,18	5,84	12,9
4	2,13	2,78	4,6	8,6
5	2,02	2,57	4,03	6,9
6	1,94	2,45	3,71	5,96
7	1,9	2,37	3,5	5,4
8	1,86	2,31	3,36	5,04
9	1,83	2,26	3,25	4,78
10	1,81	2,23	3,17	4,6
20	1,73	2,09	2,85	3,85
120	1,66	1,98	2,62	3,37
∞	1,65	1,96	2,58	3,29

Цей метод оцінювання похибки середнього значення придатний для будь-якої кількості вимірювань – як для малої, так і великої. За більших n він переходить у більш простий метод (Б.18). Дійсно, з таблиці Б.2 бачимо, що під час зростання n значення $t_{P,f}$ прямує до відповідного значення k ; наприклад, $t_{P,f} \rightarrow 1,96 \approx 2$ при $P = 0,95$. Відношення $\frac{t_{P,f}}{k} > 1$ зростає зі зменшенням n і збільшенням P . Розбіжність у значеннях $\Delta \bar{x}$, обчислених за (Б.19) і наближеною формулою (Б.18) тим більше, чим менше n .

Б.5 Інструментальна похибка

Інструментальну похибку вимірювання визначають похибкою застосовуваних засобів вимірювання, тобто вимірювальних приладів і величин. Інструментальна похибка, названа іноді *приладовою похибкою*, обумовлена багатьма

причинами, пов'язаними з конструкцією приладу, якістю його виготовлення і застосовуваних матеріалів, якістю регулювання, умовами застосування тощо. Інструментальна похибка має як систематичну, так і випадкову складову. Співвідношення між ними може бути неоднаковим для різних приладів (зазначають у паспорті приладу), однак частіше переважає систематична похибка. Інструментальну похибку можна встановити під час порівняння показань цього приладу з показаннями більш точного. У цьому разі можна одержати таблицю або графік виправлень, використання яких підвищує точність приладу.

Для багатьох засобів вимірювання широкого застосування виробники зазначають, що інструментальна похибка із досить великою ймовірністю ($P \geq 0,95$) не перевищує певного значення Δ_{instr} , названого межею похибки, яку допускають. Наприклад, вимірювальна лінійка довжиною 1 000 мм має $\Delta_{instr} = \pm 0,20$ мм, тобто виробник не гарантує, що штрихи нанесені з більшою точністю.

Зв'язок між ціною поділки шкали і Δ_{instr} строго не встановлюють, тому судити про точність приладу на підставі ціни поділки шкали можна лише дуже орієнтовно.

Вимірювальні прилади використовують, як відомо, для вимірювання змінних у часі величин і являють собою матеріальні системи, що характеризуються різними інерційними властивостями (механічними, тепловими та ін.). Інерційність приладів за змінного режиму роботи призводить до запізнювання їх показань, тобто до відставання показань від зміни вимірюваної величини, що викликає *динамічні похибки*.

Величина запізнювання показань залежить, в основному, від принципу дії та будови вимірювального приладу. На неї впливають інерція рухливої частини приладу, теплоємність і теплопровідність термочутливого елемента і спосіб його установлення, довжина і діаметр сполучних трубок тощо.

Залежність показань приладу від зміни вимірюваної величини в несталому режимі (перехідному процесі) називають *динамічною характеристикою* вимірювального приладу. Вид динамічної характеристики визначається характером зміни, що

відбувається з вимірювальною величиною, і типом вимірювального приладу.

Похибка кожного конкретного приладу є систематичною, але її значення зазвичай невідоме, а виходить її неможливо виключити введенням у результат вимірювання відповідного виправлення.

Зазвичай ціна найменшої поділки шкали стрілочного приладу узгоджена з похибкою самого приладу. Якщо клас точності використовуваного приладу невідомий, за похибку $\sigma_{\text{прил.}}$ завжди беруть половину ціни її найменшої поділки. Зрозуміло, що під час зчитування показань зі шкали недоцільно намагатися визначити одиниці розподілу, тому що результат вимірювання від цього не стане точнішим. Межу допустимої похибки цифрового вимірювального приладу розраховують за паспортним даними, утримуючу формулу для розрахунку похибки саме щодо приладу.

Через те, що «приладова» похибка Δx має випадковий характер і не залежить від випадкової похибки багаторазових вимірювань, то за того самого $P=0,7$ загальна випадкова похибка багаторазових вимірювань

$$\Delta x_{\text{вип}} = \alpha_{n,p} \cdot \sigma + \Delta x_{\text{прил}} . \quad (\text{Б.20})$$

У підсумку випадкова помилка вимірювань є сумою випадкових помилок різної природи:

$$\Delta x_{\text{вип}} = \alpha_{n,p} \cdot \sigma + \Delta x_{\text{прил}} + \Delta x_{\text{відл}} . \quad (\text{Б.21})$$

Результат вимірювань записують у вигляді

$$x = \bar{x} \pm \Delta x_{\text{вип}} . \quad (\text{Б.22})$$

Відносна випадкова похибка:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x_{\text{вип}}}{\bar{x}}. \quad (\text{Б.23})$$

Сумарну середню квадратичну похибку $\sigma_{\text{сум}}$, обумовлену спільною дією інструментальної і випадкової похибок, можна оцінити за формулою

$$\sigma_{\text{сум}} = \sqrt{\frac{1}{3} \Delta_{\text{інстр.}}^2 + \sigma^2}. \quad (\text{Б.24})$$

Якщо вимірювання виконані кілька разів і за результат взято середнє значення, то в (Б.24) замість середньої квадратичної похибки σ потрібно поставити середню квадратичну похибку одиничного вимірювання $\sigma_{\bar{x}}$. У разі, коли одна із цих складових переважає над іншою, можна знехтувати малою похибкою. Випадкову похибку вважають нехтовно малою, якщо $\Delta_{\text{інстр}} > 8\sigma$ ($\Delta_{\text{інстр}} > 8\sigma_x$). Інструментальну похибку вважають нехтовно малою, якщо $\Delta_{\text{інстр}} < 8\sigma$ ($\Delta_{\text{інстр}} < 8\sigma_x$).

Кінцевий результат багаторазового вимірювання містить у собі як випадкову, так і приладову похибку. Випадкова похибка зменшується зі збільшенням кількості окремих вимірювань, а приладова похибка не змінюється, залишаючись у межах $\pm\sigma_{\text{прил.}}$. Під час виконання багаторазового вимірювання бажано одержати стільки окремих вимірювань, скільки необхідно для виконання співвідношення $\Delta x_{\text{вип}} \ll \sigma_{\text{прил.}}$.

У такому разі похибка результату вимірювань буде цілком визначена лише приладовою похибкою. Однак частіше трапляється ситуація, коли випадкова і приладова похибки близькі за значенням, а тому обидві впливають на кінцевий результат. Тоді їх необхідно враховувати спільно і за сумарну похибку беруть

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{вип}})^2 + (\sigma_{\text{прил.}})^2}. \quad (\text{Б.25})$$

Оскільки випадкову похибку зазвичай оцінюють із довірчою ймовірністю 0,68, а $\sigma_{\text{прил}}$ – оцінка максимальної похибки приладу, то можна вважати, що вираз (Б.25) задає довірчий інтервал також з ймовірністю не меншою ніж 0,68. Під час виконання однократного вимірювання оцінкою похибки результату є вираз $\Delta x = \sigma_{\text{прил}}/3$, що враховує лише гранично допустиму приладову похибку.

Трапляються ситуації, коли випадкову і приладову похибки вдається зрівняти без обчислень $\Delta x_{\text{вип}}$. Це можливо, якщо результати окремих вимірювань не виходять за межі допустимої приладової похибки:

$$(x_{\text{max}} - x_{\text{min}}) \leq 2\sigma_{\text{прил}}, \quad (\text{Б.26})$$

де x_{max} і x_{min} – найбільше й найменше значення вимірюваної величини. Підвищення точності багаторазового вимірювання в такому разі неможливе, а похибкою кінцевого результату буде $\sigma_{\text{прил}}/3$.

Б.6 Облік похибки і порядок виконання округлення в записі кінцевого результату вимірювання

Завершенням оброблення даних багаторазового прямого вимірювання за заданої довірчої ймовірності є два числа: середнє значення вимірюваної величини і його похибка (напівширина довірчого інтервалу). Ці числа є кінцевим результатом багаторазового вимірювання і повинні бути спільно записані в стандартній формі, що містить лише достовірні, тобто надійно обмірювані цифри цих чисел:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (\text{Б.27})$$

Помилкою було б вважати, що висока точність обчислень під час оброблення даних може сприяти одержанню більше точного результату вимірювання. Адже оброблення даних, якою б складною і трудомісткою вона не була, є вторинною щодо

природи досліджуваного об'єкта і процесу вимірювання. В кінцевих числових значеннях це варто враховувати, що і роблять методом їхнього округлення.

Необхідність округлення є простим наслідком невизначеності під час оцінювання кінцевих результатів, що знаходять за даними експерименту. Обмежена кількість вимірювань вносить невизначеність як у середнє значення, так і в похибку. У математичній статистиці показано, що відносна неточність оцінювання величини $s(\bar{x})$ становить приблизно

$$\frac{1}{\sqrt{n-1}}, \text{ де } n - \text{кількість використуваних окремих вимірювань.}$$

Під час $n \sim 10$ відносна похибка оцінювання $s(\bar{x})$ може досягати 30%. Зрозуміло, що тоді немає сенсу приводити в похибки зайві цифри, які виявляться свідомо ненадійними. Правда, під час виконання проміжних розрахунків корисно мати одну або дві додаткові цифри, які знадобляться в процесі округлення. Порядок округлення результатів вимірювання відбувається за таким принципом:

1. Виконати попередній запис кінцевого результату вимірювання у вигляді $x = \bar{x} \pm \Delta x$ і винести за загальну дужку однакові порядки середнього значення \bar{x} і похибки Δx , тобто множник вигляду 10^k , де k – ціле число. Числа в дужках переписати в десятковому вигляді з використанням коми, забравши тим самим порядкові множники, що залишилися.

2. Округлити в дужках число, що відповідає похибці вимірювань: до однієї значущої (ненульової) цифри ліворуч, якщо ця цифра більша ніж 2, або до двох перших цифр у протилежному разі. Під час округлення використовують правило: якщо цифра, яка розміщена за тією, що менше 5, то її просто відкидають, інакше цифру, яку залишають, збільшують на одиницю. Якщо цифру, що відкидають, дорівнює 5, то найменшу помилку досягають під час округлення за правилом Гауса до найближчого парного числа. Наприклад, 4,5 округляють до 4, у той самий час 3,5 округляють до 4.

3. Округлити в дужках число, що відповідає середньому значенню: останніми праворуч залишають цифри тих розрядів, які збереглися в похибці після її округлення.

4. Кінцево записати $x = \bar{x} \pm \Delta x$ з урахуванням виконаних округлень. Загальний порядок і одиниці вимірювання величини наводять за дужками – отримана стандартна форма запису.

Таблиця Б.3 – Запис кінцевого результату вимірювання

Попередній запис	Стандартна форма запису
$U = (528,112 \pm 152,4) \cdot 10^1 \text{ мВ}$	$U = (5,3 \pm 1,5) \cdot 10^2 \text{ мВ}$
$I = (0,418 \pm 0,042) \text{ А}$	$I = (0,42 \pm 0,04) \text{ А}$
$R = (0,03643 \pm 0,00021) \text{ Ом}$	$R = (36,43 \pm 0,21) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$
$f = (125,3 \pm 41) \text{ Гц}$	$f = (0,13 \pm 0,04) \cdot 10^3 \text{ Гц}$
$t = (8,72 \cdot 10^2 \pm 30) \cdot 10^{-1} \text{ мс}$	$t = (87 \pm 3) \text{ мс}$

Б.7 Похибки непрямих вимірювань

Здебільшого в експериментах використовують непрямі вимірювання. Досліджувану величину f визначають за результатами прямих вимірювань інших фізичних величин, наприклад, x, y, z, \dots , з якими вона пов'язана заздалегідь установленим функціональним математичним співвідношенням

$$f = f(x, y, z, \dots). \quad (\text{Б.28})$$

Цей зв'язок повинен бути відомим експериментаторові. Крім даних прямих вимірювань, як параметри (Б.28) можуть виявитися інші величини, точно задані або отримані в інших вимірюваннях, – вони становлять набір вихідних даних. Вираз (Б.28), записаний у явному вигляді, називають *робочою формулою* і використовують як для оцінювання результату непрямого вимірювання \bar{f} , так і для оцінювання похибки вимірювання Δf . Зазвичай обидві оцінки пов'язані з кінцевими

результатами прямих вимірювань $\bar{x} \pm \Delta x$, $\bar{y} \pm \Delta y$, $\bar{z} \pm \Delta z \dots$. Зазвичай, щоб одержати (Б.28), використовують модельний опис, і щоб уникнути модельних похибок під час вимірювання f , він повинен адекватно відбивати досліджуване фізичне явище. Якщо модель точна, то модельні похибки виключені, а непряме вимірювання дає надійні результати.

Розглянемо випадок, коли похибки вимірювання величин x, y, z, \dots мають лише випадковий характер і відповідають нормальному закону розподілу. Крім цього, похибка кожного окремо взятого прямого вимірювання незалежна, тобто не піддається впливу випадкових факторів, що викликають похибки інших прямих вимірювань, виконаних в експерименті. Такі вимірювання і самі вимірювані величини називають *статистично незалежними*, або просто незалежними. Під час виконання зазначених умов середнє значення величини f визначають, виходячи із середніх значень величин x, y, z, \dots :

$$\bar{f} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots). \quad (\text{Б.29})$$

Якщо точність прямих вимірювань достатньо висока, тобто $\Delta x \ll \bar{x}$, $\Delta y \ll \bar{y}$, $\Delta z \ll \bar{z}$, \dots , то похибки результатів прямих вимірювань переносять на результат непрямого вимірювання як незалежні нормальні розподіли f навколо \bar{f} за кожним з аргументів (Б.28).

Спільний розподіл навколо f , що враховує окремі розподіли кожного з аргументів (Б.28), повинна визначати похибка непрямого вимірювання Δf . Ці розподіли нормальні й незалежні, тому дисперсія їх спільного розподілу дорівнює сумі їх дисперсій, що строго доведено в математичній статистиці. Тоді середнє квадратичне відхилення спільного розподілу, що обчислюють як корінь із дисперсії, знаходять з виразу:

$$\Delta f = \sqrt{(\Delta f_x^2 + \Delta f_y^2 + \Delta f_z^2 + \dots)}. \quad (\text{Б.30})$$

Цей вираз має загальний характер і його можна використати для оцінювання похибки непрямого вимірювання, виконаного за будь-якого вигляду функції $f(x, y, z, \dots)$ Однак варто пам'ятати, що під час безпосередніх розрахунків у (Б.30) необхідно підставляти похибки Δx , Δy , Δz , ..., знайдені для того самого значення довірчої ймовірності. Похибка непрямого вимірювання \bar{f} також буде відповідати цьому значенню довірчої ймовірності. Рекомендують використовувати значення ймовірності $P=0,68$. Застосуємо (Б.30) до певних поширених залежностей. Найцікавішими є ті випадки, коли за допомогою (Б.30) вдається встановити функціональний зв'язок між похибками прямих вимірювань і похибкою непрямого вимірювання. Таблиця Б.4 містить вирази, що задають такий зв'язок.

Таблиця Б.4 – Зв'язок похибок прямих і непрямих вимірювань

Робоча формула	Формула похибки
1	2
$f = Ax \pm By \pm Cz$	$\Delta f = \sqrt{(A \cdot \Delta x)^2 + (B \cdot \Delta y)^2 + (C \cdot \Delta z)^2}$
$f = Ax^{\pm\alpha} \cdot By^{\pm\beta} \cdot Cz^{\pm\gamma}$	$\Delta f = \sqrt{(\alpha \cdot \delta x)^2 + (\beta \cdot \delta y)^2 + (\gamma \cdot \delta z)^2}$
$f = \ln x$	$\Delta f = \frac{\Delta x}{x}$
$f = e^x$	$\delta f = \Delta x$
$f = A \cdot \sin \varphi$	$\Delta f = A \cdot \cos \varphi \cdot \Delta \varphi$

У таблиці Б.4 використані такі позначення:

Δ – для абсолютної похибки;

δ – для відносної похибки;

$A, B, C, \alpha, \beta, \gamma$ – сталі коефіцієнти;

x, y, z, φ – результати прямих вимірювань;

f – результат непрямого вимірювання.

ДОДАТОК В (обов'язковий) Сертифікація та стандартизація в Україні

В.1 Сертифікація в Україні

Сертифікація – процедура, за допомогою якої визнаний в установленому порядку орган документально засвідчує відповідність продукції, систем якості, систем управління якістю, систем управління довкіллям, персоналу встановленим законодавчим вимогам.

Основні положення щодо сертифікації визначено Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO) в постанові «Управління системою знаків відповідності стандарту і їх значення для споживачів» (13-1977), «Кодекс принципів по системах сертифікації третьої сторони і відповідних стандартів» (16-1978), а також у рекомендаціях щодо сертифікації, підготовлених ISO разом із багатьма міжнародними торговельними організаціями й опублікованими в 1980 р.

Відповідно до Декрету Кабінету Міністрів України «Про стандартизацію і сертифікацію» № 46-93 від 10.05.1993 на Державний Комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики покладено створення та забезпечення функціонування державної системи сертифікації.

Державний Комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики є національним органом України зі сертифікації.

Держстандарт України виконує такі функції:

- визначає основні принципи, структуру та правила системи сертифікації в Україні;
- затверджує переліки продукції, що підлягає обов'язковій сертифікації, з зазначенням нормативних документів, на відповідність яких проводять сертифікацію;
- здійснює контроль за дотриманням правил сертифікації та за сертифікованою продукцією та інформує заявлені організації та громадськість із результатами сертифікації.

Україна приєдналась до міжнародних систем сертифікації:

- системи міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) з випробувань електрообладнання на відповідність стандартам безпеки;
- системи сертифікації компонентів електронної техніки МЕК.

В Україні діє державна система сертифікації продукції.

На території України діє декілька організацій, що надають послуги сертифікації імпортової та вітчизняної продукції.

В.2 Стандартизація в Україні

Стандартизація – діяльність, що полягає в установленні положень для загального та неодноразового використання щодо наявних чи потенційних завдань і спрямована на досягнення оптимального ступеня впорядкованості в певній сфері.

Під стандартизацією розуміють діяльність, спрямована на досягнення впорядкування в певній сфері за допомогою встановлення положень для загального і багатократного вживання відносно реально існуючих і потенційних завдань. Цю діяльність виявляють у розробленні, публікації вживанні стандартів.

Стандартом називають документ, в якому в цілях добровільного багатократного використання встановлюють характеристики продукції, правила здійснення і характеристики процесів виробництва, експлуатації, зберігання, перевезення, реалізації й утилізації, виконання робіт або надання послуг. Стандарт також може містити вимоги до термінології, символіки, упаковки, маркування або етикеток і правил їх нанесення.

В.2.1 Результати та види стандартизації

За версією ISO найважливішими результатами стандартизації повинні бути:

- підвищення ступеня відповідності продукції, процесів та послуг їх функціональному призначенню;
- усунення перешкод у торгівлі;
- сприяння науково-технічному співробітництву.

За рівнем стандартизації прийняті такі її види:

- міжнародна стандартизація – стандартизація, яку проводять на міжнародному рівні та участь в якій відкрита для відповідних органів усіх країн;
- регіональна стандартизація – стандартизація, яку проводять на відповідному регіональному рівні та участь, в якій відкрита для відповідних органів країн певного географічного або економічного простору;
- національна стандартизація – стандартизація, яку проводять на рівні однієї країни.

В.2.2 Об'єкти та суб'єкти стандартизації

Об'єктами стандартизації є такі:

- матеріали, складники, обладнання, системи, їх сукупність;
- правила, процедури, функції, методи, діяльність чи її результати, включаючи продукцію, персонал, системи управління;
- вимоги до термінології, позначення, фасування, пакування, маркування, етикетування тощо.

Суб'єктами стандартизації є такі:

- центральний орган виконавчої влади з питань стандартизації (ЦОВМ);
- рада стандартизації та технічного регулювання;
- технічні комітети стандартизації;
- інші суб'єкти, що займаються стандартизацією.

Центральні органи виконавчої влади та організації мають право у відповідних сферах діяльності та в межах повноважень з урахуванням своїх господарських та професійних інтересів організовувати і виконувати роботи із стандартизації, зокрема:

- розробляти, схвалювати, приймати, переглядати, змінювати стандарти відповідного рівня та припиняти їх дію, встановлювати правила їх розроблення, позначення та застосування;
- представляти Україну у відповідних спеціалізованих міжнародних та регіональних організаціях стандартизації, виконувати зобов'язання, передбачені положеннями про ці організації;

– створювати і вести реєстри нормативно-правових актів та нормативних документів для забезпечення своєї діяльності та інформаційного обміну;

– видавати та розповсюджувати свої стандарти, документи спеціалізованих відповідних міжнародних та регіональних організацій стандартизації, членами яких вони є чи з якими співпрацюють на основі положень про ці організації або відповідних договорів, а також делегувати ці повноваження іншим організаціям.

В.2.3 Мета і завдання стандартизації

Метою стандартизації в Україні є забезпечення раціонального використання природних ресурсів, відповідності об'єктів стандартизації їх функціональному призначенню, інформування споживачів про якість продукції, процесів та послуг, підтримка розвитку і міжнародної конкурентоспроможності продукції та торгівлі товарами і послугами.

Завдання стандартизації полягають у створенні умов для досягнення:

- економії всіх видів ресурсів;
- безпеки продукції, робіт і послуг для довкілля, життя, здоров'я і майна;
- безпеки господарських об'єктів із урахуванням ризику виникнення природних і техногенних катастроф та інших надзвичайних ситуацій;
- технічної та інформаційної сумісності, а також взаємозамінюваності продукції;
- якості продукції, робіт і послуг відповідно до рівня розвитку науки, техніки і технології;
- єдності вимірювань;
- обороноздатності й мобілізаційної готовності країни.

Стандартизація як основа технічного регулювання (діяльність, що спрямована на досягнення оптимального ступеня впорядкованості за даних умов) знаходить широке застосування майже в усіх галузях, вона чітко встановлює вимоги до продукції (військове озброєння, атомна енергетика, аерокосмічна галузь

тощо) та питань безпеки, вона дозволяє досягати рівня стандартної (базової) або навіть конкурентоспроможної якості (наприклад, на рівні галузевих стандартів) відповідно до мети застосування.

Національна стандартизація через процес гармонізації з міжнародними нормативними документами, що одержали міжнародне визнання, служить перепусткою на світові ринки для вітчизняних виробників.

В.2.4 Методичні основи стандартизації

Існує також низка методичних принципів, які застосовують у діяльності зі стандартизації, серед яких найважливішими є такі:

- застосування системи переважних чисел полягає у використанні певних, науково обґрунтованих, рядів чисел (номіналів) під час вибору номінальних значень параметрів виробів, що проектують і виготовляють;

- вибір та оптимізація параметричних рядів виробів, які передбачають, що параметри об'єктів стандартизації вибирають не довільно, а визначають за єдиними правилами, які нормують комплексом стандартів;

- уніфікація виробів полягає у виборі оптимальної кількості або в раціональному скороченні числа типів, видів, параметрів і розмірів об'єктів однакового чи близького функціонального призначення;

- комплексна стандартизація передбачає розроблення системи стандартів, що визначають оптимальні взаємозв'язані та взаємоузгоджені норми і вимоги до самого об'єкта та його елементів, з яких він складається чи від яких він залежить;

- випереджувальна стандартизація полягає в установленні підвищених вимог і норм відносно досягнутого рівня.

Під час розроблення стандартів використовують науково-технічні результати науково-дослідних, дослідно-конструкторських, дослідно-технологічних, проектних робіт, результати патентних досліджень, міжнародні, регіональні стандарти, правила, норми і рекомендації зі стандартизації, прогресивні національні стандарти інших країн та іншу

інформацію про сучасні досягнення вітчизняної та зарубіжної науки, техніки і технології.

В.2.5 Системи стандартів України

Загально-технічні та організаційно-методичні стандарти, зазвичай, об'єднують у комплекси (системи) стандартів для нормативного забезпечення в певній галузі діяльності. Їх використання дає можливість спростити розроблення, конструювання і підготовку виробництва нових виробів, скоротити виробничі цикли, здешевити і поруч з тим підвищити якість вдосконаленої продукції. Подальший розвиток стандартизації веде до створення великих комплексів, що охоплюють цілі галузі, а часто такі комплекси стають і міжгалузевими.

До числа міжгалузевих систем входять такі:

- єдина система конструкторської документації (ЄСКД);
- єдина система технологічної документації (ЕСТД);
- система метрологічних стандартів, об'єднаних назвою «Метрологія»;
- система стандартів безпеки праці (ССБП);
- єдина система технологічної підготовки виробництва (ЄСТПВ);
- система розроблення й впровадження продукції у виробництво (СРПВ);
- система стандартів у галузі охорони природи;
- система стандартів на коди і кодування інформації тощо.

До систем, які не можна назвати міжгалузевими, бо мають загальнодержавне значення, необхідно віднести Державну систему стандартизації України. Стандарти Державної системи стандартизації України позначають перед реєстраційним номером цифрою 1.

Види стандартів в Україні такі:

- державні стандарти України (ДСТУ) містять вимоги, які стосуються забезпечення безпеки машинобудівної продукції для здоров'я людей і гігієни роботи, забезпечення єдності вимог під час розроблення, виготовлення, експлуатації й збереження

машинобудівної продукції. Вимоги державних стандартів підлягають безумовному виконанню на всій території України;

- галузеві стандарти України (ГСТУ) розробляють на продукцію, на яку відсутній державний стандарт України, або якщо буде потреба встановити нові вимоги, що перевищують або доповнюють вимоги державних стандартів;

- стандарти науково-технічних та інженерних товариств і спілок України (СНТС) розширюють результати фундаментальних і прикладних досліджень, отриманих в окремих сферах знань або в сферах професійних інтересів;

- технічні умови (ТУ) є нормативним документом, що визначає необхідні експлуатаційні умови продукції, що випускають і для якої відсутній державний або галузевий стандарт;

- стандарт організації України (СОУ) розробляють на продукцію або на технологічний процес, які реалізують на конкретному підприємстві.

Крім вищезазначених, до категорії нормативних документів зі стандартизації також належать: міждержавні стандарти; регіональні стандарти; міжнародні стандарти (ISO); національні стандарти інших країн. Міжнародні, міждержавні, регіональні й національні стандарти інших країн в Україні застосовують у рамках міжнародних договорів у встановленому порядку.

З 1 січня 2016 р. деякі європейські та міжнародні стандарти почали діяти на території України замість національних стандартів. Про це йдеться в наказі Міністерства економічного розвитку і торгівлі України № 1493 «Про прийняття європейських і міжнародних нормативних документів як національних стандартів України, змін до національних стандартів України та скасування національних стандартів України» від 30 грудня 2014 року. На виконання цього наказу було сформовано три переліки прийнятих та скасованих нормативних документів. Відповідні зміни відбуваються за законом «Про стандарти, технічні регламенти та процедури оцінки відповідності» та на виконання статей 26 і 124 Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом.

Навчальне видання

Соколов Сергій Вікторович,
Соколов Олександр Сергійович,
Антоненко Сергій Сергійович

КОНТРОЛЬ І ВИМІРЮВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Конспект лекцій
для студентів спеціальності
151 *«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»*
освітнього ступеня «бакалавр»
усіх форм навчання

Відповідальний за випуск **О. О. Дрозденко**
Редактор **Н. М. Мажуга**
Комп'ютерне верстання: **С. В. Соколов, О. С. Соколов,
С. С. Антоненко**

Підписано до друку 27.01.2020, поз. 4.
Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 13,95. Обл.-вид. арк. 13,82. Тираж 5 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.