Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

МЕТРОЛОГІЯ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ПРИЛАДИ

Конспект лекцій
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Системи керування безпілотними апаратами»,
галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво
(17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації)
спеціальності G7(174) Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2025

УДК 621.317.3(07)
М54

Рекомендовано до видання вченою радою факультету комп’ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № ___ від _____ 2025 року.

Голова Вченої ради факультету КІТ _____ Інна КОНДІУС

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ
Директор бібліотеки _____ Наталія ПОЛІЩУК

Затверджено вченою радою факультету комп’ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № __ від «___» _____ 2025 року.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ, протокол № __ від «___» _____ 2025 року.

Завідувач кафедри АКІТ _____ Олександр ПОВСТЯНОЙ

Укладач: _____ Віктор ДЕНИСЮК, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ.

Рецензент: _____ Олег КАЙДИК, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерної інженерії та безпеки ЛНТУ.

Відповідальний за випуск: ___ _____ Олександр ПОВСТЯНОЙ, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ.

М54 Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Системи керування безпілотними апаратами», галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво (17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації) спеціальності G7(174) Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка денної та заочної форм навчання / уклад. В. Ю. Денисюк. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 252 с.

Конспект лекцій містять теоретичний матеріал, необхідний для розкриття дисципліни. Лекційний матеріал сприяє оволодінню здобувачем вищої освіти теоретичного базису, розвитку навичок розрахунково-аналітичної роботи, розкриттю можливостей використання отриманих знань на практиці. Призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності G7 (174) Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка денної та заочної форми навчання.

ЗМІСТ

		Стор.
ВСТУП		6
Тема 1	Державна метрологічна служба та державна система забезпечення єдності вимірювань ……...…	7
	1.1 Метрологія – наука про вимірювання……...	7
	1.2 Основні метрологічні поняття та визначення……..	9
	1.3 Єдність вимірювань та їх метрологічне забезпечення…….	13
	1.4 Державна система забезпечення єдності вимірювань…….	14
	1.5. Метрологічна служба України…….....	15
	1.6 Метрологічний контроль і нагляд за засобами вимірювальної техніки…….	20
	1.7 Міжнародні метрологічні організації……	22
	1.8 Еталони одиниць фізичних величин…….	23
Тема 2	Методи вимірювань, статичні та динамічні похибки вимірювання……	27
	2.1 Класифікація вимірювань……..	27
	2.2 Принцип і метод вимірювання……...	32
	2.3 Класифікація методів вимірювань……	33
	2.4 Похибки вимірювань……..	37
	2.5 Статичні характеристики……	43
	2.6 Динамічні характеристики…….	46
	2.7 Похибки вимірювальних пристроїв…….	50
Тема 3	Обробка результатів вимірювань……	61
	3.1 Основні етапи обробки результатів вимірювань…….	61
	3.2 Обробка результатів прямих вимірювань…….	72
	3.3 Сумісне підсумовування систематичних та випадкових похибок……...	77
	3.4 Обробка результатів опосередкованих вимірювань……	78
	3.5 Обробка результатів сумісних вимірювань. Вимірювання параметрів залежностей між фізичними величинами……..	82
	3.6 Обробка результатів сукупних вимірювань……	86
Тема 4	Вимірювальна система та її функціональні складові……..	92
	4.1 Різновиди засобів вимірювальної техніки……...	92
	4.2 Аналогові і цифрові прилади……..…	93
	4.3 Вимірювальний канал…….……....	95
	4.4 Вимірювальні системи……...	96
	4.5 Вимірювальна установка…….....	99
	4.6 Вимірювальні пристрої……..	99
Тема 5	Метрологічне забезпечення вимірювань……	101
	5.1 Повірка та калібрування засобів вимірювання……	101
	5.2 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання температури……	102

5.3 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання тиску та витрат…….. 104
5.4 Випробувальні установки для повірки лічильників кількості рідин…… 107
Тема 6 Системи дистанційної передачі, нормуючі перетворювачі…….. 109
6.1 Загальні відомості про вимірювальні перетворення…… 109
6.2 Класифікація та характеристики вимірювальних перетворювачів……..….. 111
6.3 Вимірювальні перетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом……. 113
6.4 Аналогові системи передачі сигналів…… 115
6.5 Первинні перетворювачі неелектричних величин……... 120
6.6 Цифрові вимірювальні перетворювачі…….. 127
Тема 7 Методи і прилади для вимірювання температури…….. 132
7.1 Основні поняття про температуру. Температурні шкали…... 132
7.2 Класифікація засобів для вимірювання температури……. 135
7.3 Термометри розширення…… 136
7.4 Термоелектричні термометри……. 141
7.5 Прилади для вимірювання термоелектрорушійної сили……. 146
7.6 Електричні термометри опору……..... 151
7.7 Пірометри випромінювання……..... 156
7.8 Цифрові прилади для вимірювання температури…… 162
7.9 Тепловізори…….. 164
Тема 8 Вимірювання геометричних розмірів …… 167
8.1 Вимірювання лінійних та кутових розмірів……. 167
8.2 Вимірювання товщини шару покриття……. 169
8.3 Вимірювання відстаней між об’єктами……. 171
Тема 9 Вимірювання тиску…… 175
9.1 Загальні відомості та класифікація засобів вимірювання тиску…… 175
9.2 Рідинні та поршневі манометри……. 177
9.3 Пружні чутливі елементи деформаційних манометрів…… 180
9.4 Деформаційні прилади для вимірювання тиску……... 182
9.5 Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску…….. 183
9.6 Диференціальні манометри…… 188
Тема 10 Вимірювання кількості та витрат……..... 191
10.1 Загальні відомості про вимірювання витрат рідин і газів…. 191
10.2 Вимірювання витрат за перепадом тиску……... 191
10.3 Витратоміри постійного перепаду тиску…… 195
10.4 Лічильники кількості витрат…… 196
10.5 Ультразвукові витратоміри……..…… 198
Тема 11 Вимірювання рівня ……..…….. 201
11.1 Класифікація методів та приладів для вимірювання рівня... 201
11.2 Візуальні та поплавкові рівнеміри…….. 201

11.3 Вимірювання рівня сипких речовин……..... 204
11.4 Гідростатичні та буйкові рівнеміри……..... 206
11.5 Ємнісні рівнеміри та кондуктометричні сигналізатори рівня……... 207
11.6 Акустичні рівнеміри..... 209
Тема 12 Вимірювання складу рідин …….…….. 212
12.1 Електропровідність розчинів електролітів……. 212
12.2 Електрокондуктометричні аналізатори…….. 213
12.3 Принцип дії та класифікація оптичних аналізаторів речовин……... 215
12.4 Потенціометричний метод аналізу……..… 217
12.5 Порівняльні та вимірювальні електроди……. 218
12.6 Вимірювальні схеми pH-метрів……..... 220
Тема 13 Вимірювання складу газів ……... 222
13.1 Методи та засоби вимірювання складу газових середовищ. 222
13.2 Дифузійні аналізатори…….. 223
13.3 Магнітні аналізатори……. 225
13.4 Сорбційні аналізатори…….. 226
13.5 Іонізаційні та полум'яно-іонізаційні газоаналізатори……... 227
13.6 Термохімічні та хемілюмінесцентні аналізатори…….. 229
13.7 Фотометричні аналізатори видимого випромінювання……. 231
13.8 Оптико-акустичні аналізатори……..... 232
Тема 14 Вимірювання вологості…….. 234
14.1 Вологість газів……... 234
14.2 Методи вимірювання вологості газів……..… 235
14.3 Психрометричний метод вимірювання вологості газів…..... 236
14.4 Випаровувальні аналізатори……. 237
14.5 Конденсаційні аналізатори…….. 239
14.6 Вимірювання вологості твердих тіл і сипких речовин…….. 240
Тема 15 Автоматизовані системи контролю……. 244
15.1 Автоматизовані системи контролю та управління……. 244
15.2 Застосування комп'ютеризованих вимірювальних засобів у технологічних процесах та енергетичних системах…….. 245
15.3 Класифікація методів та засобів автоматичного контролю якості продукції……. 246
15.4 Структурні схеми автоматичних аналізаторів…… 247
15.5 Способи підключення аналізаторів до технологічних потоків…… 249
ЛІТЕРАТУРА…….. 251

ВСТУП

Вимірювання, як один із способів пізнання природи, сприяє новим науково-технічним відкриттям та їх впровадженню у виробництво, забезпечує об'єктивний контроль за технологічними процесами, підвищує надійність та ефективність роботи обладнання. Особливо важливе значення відіграє контроль за технологічними процесами у вирішенні проблеми забезпечення якості продукції виробництва.

Сучасні автоматизовані системи управління технологічними процесами вимагають значної кількості вимірювань і застосування засобів вимірювань, що можуть забезпечити отримання сигналів вимірювальної інформації у формі, зручній для дистанційної передачі, збору, подальшого перетворення, оброблення та використання.

Для опису процесів та явищ, а також властивостей матеріальних тіл використовуються різні фізичні величини, кількість яких досягає десятків тисяч: електричні, магнітні, просторові і часові, механічні, акустичні, оптичні, хімічні, біологічні тощо. У технологічних виробничих процесах всі ці величини різняться не тільки якісно, але й кількісно і оцінюються різними числовими значеннями та потребують застосування відповідних методів та технічних засобів вимірювання.

Тематичні розділи навчального посібника підібрані згідно до рекомендованих програм навчання студентів на спеціальностях, пов'язаних з автоматизацією виробничих процесів.

Пропонований конспект лекцій складений відповідно до робочої програми дисципліни «Метрологія, технологічні вимірювання та прилади» та призначений допомогти студентам при її вивченні. В ньому викладені основи метрології, як науки про вимірювання: основні поняття та їх визначення, загальний аналіз методів вимірювання, похибки вимірювань та обробка результатів вимірювань, організація та планування вимірювального експерименту, метрологічне забезпечення вимірювань. Також розглядаються загальнотехнічні вимірювання та прилади: методи та технічні засоби для вимірювання технологічних параметрів різної фізичної природи – температури, тиску й витрат, геометричних розмірів, складу та властивостей речовин. Приділена увага методам первинного перетворення фізичних величин, отримання та передачі сигналів вимірювальної інформації.

ТЕМА 1
ДЕРЖАВНА МЕТРОЛОГІЧНА СЛУЖБА ТА ДЕРЖАВНА СИСТЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ

План

1.1 Метрологія – наука про вимірювання.
1.2 Основні метрологічні поняття та визначення.
1.3 Єдність вимірювань та їх метрологічне забезпечення.
1.4 Державна система забезпечення єдності вимірювань.
1.5. Метрологічна служба України.
1.6 Метрологічний контроль і нагляд за засобами вимірювальної техніки.
1.7 Міжнародні метрологічні організації.
1.8 Еталони одиниць фізичних величин.

1.1 Метрологія – наука про вимірювання

Метрологія як наука зародилась задовго до нашої ери, а сам термін «метрологія» утворений із двох грецьких слів: метрон – міра і логос – вчення. Отже, у дослівному перекладі метрологія – вчення про міри.

У сучасному розумінні метрологія – це наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення необхідної точності. На практиці застосовують також скорочене означення: метрологія – наука про вимірювання.

Основними термінами, якими оперує метрологія, є фізична величина, одиниця фізичної величини, передавання розмірів фізичної величини, засоби вимірювальної техніки, метод вимірювання, методика вимірювання, результат вимірювання, похибка вимірювання, метрологічне забезпечення вимірювань, метрологічна служба, метрологічна перевірка та атестація засобів вимірювальної техніки тощо.

З поняттям «метрологія» нерозривно пов’язані поняття «вимірювання» та «єдність вимірювань».

Вимірювання – це відображення фізичних величин з використанням експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів.

Вимірювання є невід’ємною частиною усіх сфер життя і діяльності людини – від елементарних вимірювань таких величин, як довжина, об’єм, маса, час тощо, до вимірювань параметрів ядерних реакцій та досліджень космосу, наприклад, температури та енергії випромінювання Сонця.

Однією із найважливіших характеристик вимірювання є їх точність, яка відображає близькість результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини. Для того, щоб можна було порівнювати результати вимірювань одних і тих самих величин, які виконані в різних місцях, у різний час та з використанням різних методів вимірювань і різних засобів вимірювальної техніки, вимірюванням повинна бути властива єдність.

Єдність вимірювань – стан вимірювань, за якого їх результати виражаються

в узаконених одиницях, а похибки вимірювань відомі із заданою ймовірністю та не виходять за встановлені межі.

Поняття «єдність вимірювань» охоплює низку найважливіших задач метрології:

– уніфікацію одиниць фізичних величин;

– розроблення схем відтворення одиниць фізичних величин і передавання їх розмірів робочим засобам вимірювальної техніки із встановленою точністю;

– виконання вимірювань з похибкою, яка не перевищує встановлених границь;

– запис результату вимірювання у стандартизованій формі.

Єдність вимірювань забезпечується дотриманням певних норм, вимог та правил виконання вимірювань, встановлених державними стандартами України (ДСТУ) та іншими нормативно-технічними документами (НТД) у галузі метрології.

Залежно від розв'язуваних задач метрологія поділяється на законодавчу, теоретичну та прикладну.

Законодавча метрологія – частина метрології, що містить законодавчі акти, правила, вимоги, які регламентуються і контролюються державою для забезпечення єдності вимірювань.

Документи про метрологію та метрологічну діяльність, відносини у сфері метрології та метрологічної діяльності регулюються Законом України про метрологію та метрологічну діяльність.

Формами регламентації законодавчої метрології є державні стандарти України та інші нормативно-технічні документи (методичні вказівки, правила, рекомендації тощо).

Теоретична метрологія – частина метрології, що вивчає її теоретичні основи (теорію вимірювань) і вирішує загальнонаукові проблеми вимірювань. До теоретичної метрології належить, зокрема, теорія похибок вимірювань, яка є одним із найважливіших розділів теорії вимірювань.

Прикладна метрологія – частина метрології, що вивчає питання практичного застосування положень законодавчої метрології та досліджень теоретичної метрології, які виражаються у формах метрологічного забезпечення вимірювань.

Метрологічне забезпечення вимірювань – це встановлення метрологічних норм і правил, а також розроблення, виготовлення та застосування технічних засобів, необхідних для досягнення єдності та потрібної точності вимірювань.

Основними задачами прикладної метрології є здійснення метрологічного контролю і нагляду за засобами вимірювальної техніки під час їх виробництва та практичного застосування.

Отже, метрологія є науковою основою забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань, причому функції законодавчої та прикладної метрології підпорядковані положенням теоретичної метрології. Своєю чергою, положення теоретичної метрології теоретично перевіряються при реалізації функцій законодавчої та прикладної метрології.

Важливими суб'єктами метрології, як і будь-якої іншої науки, є предмет її вивчення, тобто мета і основні задачі, які стоять перед нею, а також методи і

засоби, за допомогою яких ці задачі розв'язують.

Предмет метрології – це отримання кількісної та якісної інформації про властивості фізичних об'єктів і процесів, встановлення та застосування наукових організаційних основ, розроблення технічних засобів, правил і норм, необхідних для досягнення єдності й необхідної точності вимірювань.

Методи метрології – це сукупність фізичних і математичних методів, які використовуються для отримання вимірювальної інформації. Зокрема, це планування та організація вимірювального експерименту, методи і методики вимірювань, методи відтворення, зберігання та передавання одиниць фізичних величин, методи вимірювальних перетворень сигналів, опрацювання результатів вимірювань тощо.

Засоби метрології – сукупність засобів вимірювальної техніки, які застосовуються для підготовки та здійснення вимірювального експерименту, а також системи організації метрологічного контролю і нагляду за засобами вимірювальної техніки.

До засобів метрології належать:

– еталони одиниць фізичних величин;

– стандартні зразки складу і властивостей речовин та матеріалів;

– робочі засоби вимірювальної техніки;

– система метрологічного контролю і нагляду за засобами вимірювальної техніки під час їх виробництва, застосування та ремонту.

1.2 Основні метрологічні поняття та визначення

Розглянемо ряд стосовних до вимірювань понять, які використовуються у даний час у метрології і вимірювальній техніці.

Фізичною величиною називають властивість, яка загальна в якісному відношенні для багатьох фізичних об'єктів, але у кількісному відношенні індивідуальна для кожного об'єкта.

Під фізичним об'єктом при цьому розуміють фізичні системи, їх стан, процеси, що в них відбуваються, а також об'єкти, в яких використовуються фізичні методи. Індивідуальність у кількісному відношенні розуміють у тому змісті, що властивість може бути притаманна одному об'єкту у визначене число разів більшою чи меншою, ніж іншому.

Розмір фізичної величини – кількісний зміст у даному об'єкті властивості, що відповідає поняттю «фізична величина». Поняття «розмір» служить для відображення об'єктивно існуючого кількісного розходження між фізичними об'єктами за розглянутою властивістю. Об'єкти, які оточують людину, здатні викликати ті чи інші відчуття в її органах відчуттів. Об'єкти зазвичай співставляються людиною за розмірами однорідних властивостей. При цьому людина використовує одну з форм свого мислення – порівняння. У результаті формуються висновки про порівняльні об'єкти: довше чи коротше, важче чи легше, тепліше чи холодніше тощо. Загальним для цих і подібних висновків є ознака «більше-менше». Можливість класифікації фізичних величин за цією ознакою є фундаментальною передумовою реалізації будь-якого вимірювання.

Однорідними фізичними величинами називають такі величини, які можна порівняти за ознаками «більше-менше». Із однорідних фізичних величин різних розмірів можна скласти послідовний ряд, в якому розмір кожної вхідної в нього величини буде більшим за розміри усіх попередніх і меншим за розміри усіх наступних величин. Ряд, який складений відповідно до даного принципу за однорідними фізичними властивостями різних фізичних об'єктів, називають послідовним натуральним рядом.

Для формування шкали (від лат. scalae – сходи) фізичної величини з послідовного натурального ряду вибирають деякі фізичні величини різного розміру, що застосовуються як відправні чи реперні (від франц. repere – стовп, рейка) точки. Сукупність вибраних реперних точок утворить шкалу розмірів фізичної величини. Із загального числа реперних точок вибирають дві, розміри S_1 і S_0 яких відносно просто реалізуються фізично з високою точністю. Ці точки називають опорними точками чи основними реперами. Інтервал між розмірами S_1 і S_0 називають основним інтервалом шкали фізичної величини. При цьому один із розмірів – S_0 приймають за початок відліку, а деяку n-ну частку цього інтервалу – за одиницю фізичної величини. Причому вибір числа n довільний. Таким чином, одиницю фізичної величини визначають шляхом пропорційного розподілу основного інтервалу:

$$[S] = (S_1 - S_0)/n, \tag{1.1}$$

де [S] – деякий розмір фізичної величини, який названий одиницею даної фізичної величини.

Одиниця фізичної величини – це фізична величина, якій приписане числове значення, рівне одиниці. Використання залежності (1.1) означає, що розміри фізичної величини, що лежать в інтервалі між S_1 і S_0, визначаються методом лінійної інтерполяції. Фізична реалізація цієї інтерполяції ґрунтується на методі вимірювальних перетворень.

Вимірювальне перетворення – це відображення розміру однієї фізичної величини розміром іншої фізичної величини, яка функціонально з нею пов'язана. Поняття вимірювального перетворення з фізичної точки зору означає, що фізична величина не може бути визначена сама по собі, а може бути сприйнята тільки через той фізичний процес, у якому вона виявляється. За допомогою вимірювальних перетворень здійснюють інтерполяцію розмірів фізичної величини усередині інтервалів між реперними точками і визначають протяжність таких інтервалів. Це дозволяє побудувати на основі вибраного вимірювального перетворення функціональну шкалу фізичної величини.

Вимірювання – це знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Вимірювання зазвичай здійснюються на природних чи створених людиною об'єктах, що називають об'єктами вимірювань.

Об'єкт вимірювання – це складне явище або процес, що характеризується множиною окремих фізичних величин (параметрів об'єкта), кожна з яких може

бути виміряна окремо, але в реальних умовах діє на вимірювальний пристрій спільно з усіма іншими параметрами.

Фізичну величину, яка вибрана для вимірювання, називають вимірювальною величиною. Процес розв'язку будь-якої задачі вимірювання включає в себе, як правило, наступні три етапи: підготовку, проведення вимірювання (вимірювального експерименту) і обробку його результатів.

У процесі проведення вимірювання об'єкт вимірювання ОВ (рис. 1.1) і засіб вимірювань ЗВ, який здатний вимірювати вибрану фізичну величину *X*, приводяться у взаємодію.

Засобом вимірювань називають технічний засіб, що використовується при вимірюваннях і який має нормовані метрологічні характеристики.

У результаті вимірювання одержують значення фізичної величини, що являє собою оцінку фізичної величини у вигляді деякого числа прийнятих для її вимірювання одиниць.

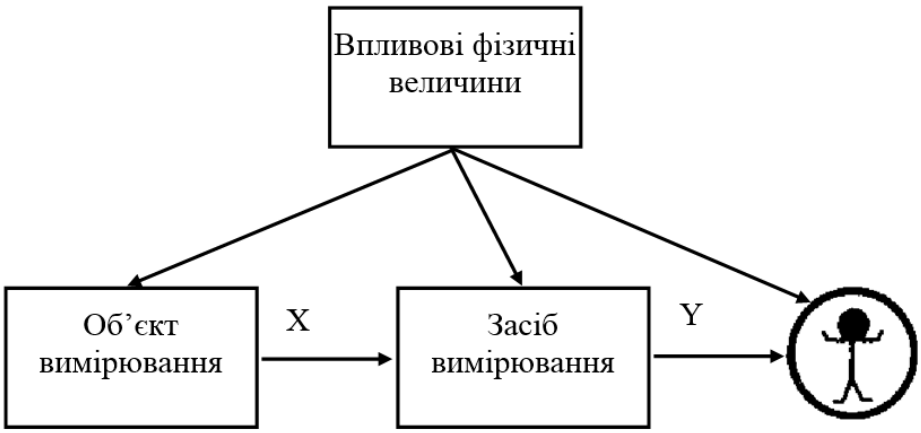


Рисунок 1.1 – Схема процесу вимірювання

Результат вимірювання величини *X* можна записати у вигляді формули, яка називається основним рівнянням вимірювання:

$$X = A[X], \tag{1.2}$$

де *A* – абстрактне число, що назване числовим значенням фізичної величини;

[*X*] – одиниця фізичної величини.

Результат вимірювання – це значення фізичної величини, яке знайдене шляхом її вимірювання.

Значення фізичної величини являє собою оцінку цієї величини у вигляді деякого числа прийнятих для неї одиниць. Розмір величини існує реально і залишається незмінним. Числове значення фізичної величини визначається прийнятою при вимірюванні одиницею цієї величини, тобто один і той же розмір може бути виражений різними числовими значеннями в залежності від прийнятої одиниці фізичної величини.

Розрізняють істинне і дійсне значення фізичної величини.

Істинне (справжнє) значення фізичної величини – це значення фізичної

величини, яке ідеальним чином відображає у якісному і кількісному відношеннях відповідну властивість об'єкта. Істинне значення завжди залишається невідомим, а удосконалювання вимірювань дозволяє наближатися до істинного значення фізичної величини.

Дійсне значення фізичної величини – це значення фізичної величини, яке знайдене експериментальним шляхом і настільки наближається до істинного значення, що може бути використане замість нього. Інформацію про значення фізичної величини, яка одержана при вимірюванні, називають вимірювальною інформацією. Засіб вимірювань ЗВ представляє вимірювальну інформацію у вигляді деякого сигналу. Під сигналом розуміють деякий фізичний процес, параметри якого містять інформацію і який сприймається людиною чи різними технічними пристроями-споживачами вимірювальної інформації. Цей сигнал функціонально зв'язаний з вимірюваною фізичною величиною, тому його називають сигналом вимірювальної інформації. У процесі вимірювання на засіб вимірювань, оператора і об'єкт вимірювань впливають, як правило, різні зовнішні фактори – впливові фізичні величини ВФВ.

Впливовою фізичною величиною називають фізичну величину, яка не вимірюється даним засобом вимірювань, але здійснює вплив на результат вимірювання цим засобом. Недосконаліть виготовлення засобів вимірювань, неточність їх градуювання, дія впливових фізичних величин (температура навколишнього середовища, вологість повітря, зовнішні електромагнітні поля, вібрації тощо), суб'єктивні помилки людини-оператора, що здійснює вимірювання, і низка інших факторів є причинами, що обумовлюють неминучу появу похибки вимірювання.

Щоб скласти уявлення про виконане чи передбачуване вимірювання, необхідно знати його основні характеристики (принцип вимірювань, метод вимірювань, похибки і точність вимірювання).

Принцип вимірювань – це сукупність фізичних явищ, на яких засноване вимірювання.

Метод вимірювань – це сукупність прийомів, використання принципів і засобів вимірювання.

Похибка вимірювання – відхилення результату вимірювання X від істинного значення X_i вимірювальної величини:

$$\Delta = X - X_i . \tag{1.3}$$

Похибка, яка визначається згідно з (1.3) і виражена в одиницях вимірюваної величини, називається абсолютною похибкою вимірювання.

Відносна похибка вимірювання – відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірюваної величини:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_i} \text{ або } \delta = \frac{\Delta}{X_i} \cdot 100\%. \tag{1.4}$$

Точність вимірювання – якість вимірювання, яка відображає близькість його результату до істинного значення вимірюваної величини. Кількісно точність може бути виражена величиною, оберненою до відповідної похибки, взятої за модулем:

$$\varepsilon = \left| \frac{X_i}{\Delta} \right|. \qquad (1.5)$$

При визначенні абсолютної та відносної похибок, а також точності вимірювання замість істинного значення фізичної величини X_i реально може бути використане її дійсне значення $X_д$.

1.3 Єдність вимірювань та їх метрологічне забезпечення

Правові основи забезпечення єдності вимірювань в Україні регулюються Законом України про метрологію та метрологічну діяльність, згідно з яким єдність вимірювань – це стан вимірювань, за якого їх результати виражаються в узаконених одиницях вимірювань, а похибки вимірювань відомі та із заданою ймовірністю не виходять за встановлені межі.

Основна суть цього означення полягає у забезпеченні такого стану вимірювань, щоб можна було порівняти результати вимірювань одних і тих самих величин, які виконані в різних місцях, у різний час та з використанням різних методів і методик вимірювань і різних засобів вимірювальної техніки.

«Єдність вимірювань» передбачає вирішення найважливіших завдань метрології: уніфікацію одиниць фізичних величин; розроблення схем збереження і відтворення розмірів одиниць фізичних величин та передачу їх робочим засобам вимірювальної техніки із встановленою точністю; виконання вимірювань з похибкою, що із заданою ймовірністю не виходить за встановлені межі; запис результату вимірювання у стандартизованій формі тощо.

Єдність вимірювань забезпечується дотриманням певних норм, вимог і правил вимірювань, встановлених державними стандартами та іншими нормативно-технічними документами в галузі метрології.

Суспільні відносини у сфері метрологічної діяльності та забезпечення єдності вимірювань на державному рівні регулюються Державною системою метрологічного забезпечення вимірювань.

Метрологічне забезпечення вимірювань – це встановлення та застосування наукових та організаційних основ, правил, норм і технічних засобів, необхідних для досягнення єдності та потрібної точності вимірювань. Основні положення метрологічного забезпечення вимірювань регламентовані Законом України про метрологію та метрологічну діяльність. Оскільки точність вимірювань залежить від характеристик використаних засобів вимірювальної техніки і методик вимірювань, то забезпечення єдності вимірювань досягається єдністю засобів вимірювальної техніки і методик виконання вимірювань. Єдність засобів вимірювальної техніки полягає в тому, що вони проградуйовані в узаконених одиницях, а їх метрологічні характеристики відповідають встановленим нормам.

Єдність методик виконання вимірювань полягає в тому, що вони задовольняють регламентовані вимоги і забезпечують офіційно гарантовану точність результатів вимірювань.

Для забезпечення єдності засобів і методик вимірювань створено комплекс норм і правил, які регламентують порядок підготовки та виконання вимірювань, опрацювання експериментальних даних, а також еталонну базу і комплекс зразкових засобів вимірювальної техніки, що забезпечують передачу розміру одиниць фізичних величин від еталонів до зразкових і робочих засобів вимірювань.

Правовою основою метрологічного забезпечення є Державна система забезпечення єдності вимірювань у вигляді державних стандартів та інших нормативно-технічних документів.

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

Організаційною основою метрологічного забезпечення є метрологічна служба країни, яка складається з Державної метрологічної служби та метрологічних служб центральних органів виконавчої влади, підприємств і організацій.

Технічною основою метрологічного забезпечення є система державних і робочих еталонів одиниць фізичних величин, система зразкових ЗВТ та стандартних зразків складу і властивостей матеріалів і речовин, система робочих ЗВТ, які застосовуються безпосередньо для розроблення, виробництва та використання продукції тощо.

Метою метрологічного забезпечення вимірювань є підвищення якості продукції, ефективності виробництва, наукових досліджень, використання матеріальних цінностей та енергетичних ресурсів, охорони довкілля тощо.

1.4 Державна система забезпечення єдності вимірювань

Державна система забезпечення єдності вимірювань (ДСВ) – це комплекс загальнодержавних нормативно-технічних і нормативних документів, які регламентують загальні правила, норми та вимоги, спрямовані на забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань.

Основними нормативно-технічними документами ДСВ є державні стандарти, які регламентують загальні правила, норми та вимоги щодо одиниць фізичних величин та їх еталонів, метрологічної термінології, нормування метрологічних характеристик, метрологічної перевірки та випробувань засобів вимірювальної техніки, методик вимірювань і форм подання результатів вимірювань тощо.

Основні вимоги ДСВ такі:

– результати вимірювань повинні виражатися в одиницях фізичних величин згідно з ДСТУ 3651.0-97;

– проектування, виробництво та експлуатація засобів вимірювальної техніки здійснюється під метрологічним наглядом згідно із Законом України про

метрологію та метрологічну діяльність;

– засоби вимірювальної техніки, призначені для серійного виробництва, підлягають випробуванням згідно з ДСТУ 3400-2000 та МИ 154-86;

– засоби вимірювальної техніки, що знаходяться в експлуатації, підлягають періодичній державній метрологічній перевірці згідно з ДСТУ 2708-99;

– метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки, що підлягають нормуванню у нормативно-технічних документах на засоби вимірювальної техніки, повинні відповідати ГОСТу 8.009-84;

– методики виконання вимірювань та характеристики похибок, які встановлюються відповідними нормативно-технічними документами, повинні відповідати ГОСТу 8.010-90;

– форма подання похибок та результатів вимірювань повинна відповідати МИ 157-86.

Поряд з цими та іншими базовими стандартами в складі ДСВ є стандарти, які регламентують конкретніші питання в окремих галузях вимірювань, наприклад, стандарти на конкретні засоби вимірювань, методи їх перевірки тощо. До складу ДСВ, крім стандартів, входять інші нормативно-технічні документи – технічні умови, інструкції, методики, методичні вказівки, правила тощо, які спрямовані на забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань у різних галузях народного господарства.

1.5 Метрологічна служба України

Метрологічна служба – це мережа організацій, окрема організація або окремий підрозділ, діяльність яких спрямована на забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань.

Метрологічну службу України згідно із «Законом України про метрологію та метрологічну діяльність» очолює Державний комітет з технічного регулювання та споживчої політики (Держспоживстандарт) України. Вона складається із Державної метрологічної служби Держспоживстандарту і метрологічних служб центральних органів виконавчої влади, підприємств і організацій, тобто так званих відомчих метрологічних служб. Метрологічна служба України – це одна із ланок управління народним господарством і основними її завданнями є здійснення комплексу заходів щодо метрологічного забезпечення підприємств і організацій, забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань, підвищення ефективності виробництва та якості продукції тощо.

Мережа державних метрологічних організацій, діяльність яких спрямована на забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань у державі, називається Державною метрологічною службою.

Державна метрологічна служба організовує, здійснює та координує діяльність, спрямовану на забезпечення єдності вимірювань в державі, а також забезпечує державний метрологічний контроль і нагляд за додержанням Закону України про метрологію та метрологічну діяльність, інших нормативно-правових актів України і нормативних документів із метрології.

Очолює Державну метрологічну службу Держспоживстандарт України і до

її складу входять (рис. 1.2):

– управління метрології Держспоживстандарту і відповідні підрозділи центрального апарату Держспоживстандарту;

– державні наукові метрологічні центри Держспоживстандарту;

– територіальні органи Держспоживстандарту;

– Державна служба єдиного часу і еталонних частот;

– Державна служба стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів;

– Державна служба стандартних довідкових даних про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів.

Державними науковими метрологічними центрами Держспоживстандарту України є:

– Національний науковий центр «Інститут метрології» (ННЦ «Метрології»);

– Державне підприємство Науково-дослідний інститут «Система» (ДП «Система»);

– Український центр стандартизації і метрології (УкрІДСМ).



Рисунок 1.2 – Структура метрологічної служби України

До компетенції Державної метрологічної служби України належить здійснення єдиної в країні технічної політики щодо забезпечення єдності вимірювань, зокрема:

– розроблення, вдосконалення, зберігання і застосування державних еталонів;

– створення систем передачі розмірів одиниць вимірювань;

– підготовка нормативних документів із метрології;

– організація і виконання фундаментальних досліджень в галузі метрології;

– державний метрологічний нагляд за виробництвом, станом, застосуванням і ремонтом засобів вимірювальної техніки;

– метрологічна експертиза конструкторської та технологічної документації, а також важливих зразків промислової продукції;

– методичне керівництво метрологічними службами центральних органів виконавчої влади, підприємств і організацій;

– підготовка кадрів (спеціалістів-метрологів);

– участь у діяльності міжнародних метрологічних організацій.

Мережа метрологічних організацій центральних органів виконавчої влади, підприємств і організацій (міністерства, відомства), діяльність яких спрямована на забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань на підприємствах міністерства (відомства), називається відомчою метрологічною службою.

Згідно із «Законом України про метрологію та метрологічну діяльність» і Р50-060-95 відомчі метрологічні служби можуть створюватися:

– у центральних органах виконавчої влади – для координації робіт, пов’язаних із забезпеченням єдності вимірювань і здійсненням метрологічного контролю і нагляду;

– в органах управління об’єднань підприємств (міністерствах, відомствах тощо) – для виконання делегованих підприємствами, що входять до складу об’єднань, функцій щодо забезпечення єдності вимірювань;

– на підприємствах і в організаціях – для забезпечення єдності вимірювань і здійснення метрологічного контролю і нагляду.

Відомча метрологічна служба міністерства (відомства, організації тощо) входить до складу єдиної метрологічної служби України і здійснює комплекс робіт із метрологічного забезпечення єдності вимірювань під час розроблення, виготовлення, випробовування та експлуатації продукції та іншої діяльності, закріпленої за міністерством (відомством, організацією тощо).

Типову структуру відомчої метрологічної служби зображено на рисунку 1.3. Відомчу метрологічну службу очолює міністерство (відомство) і до її складу входять:

– служба головного метролога міністерства (відомства);

– головна організація метрологічної служби;

– базові організації метрологічної служби;

– метрологічні служби промислових підприємств, науково-дослідних, проектно-конструкторських та технологічних організацій.

Метрологічну службу міністерства (відомства) очолює головний метролог міністерства (відомства), у підпорядкуванні якого є відділ, що входить у

центральний апарат міністерства (відомства).

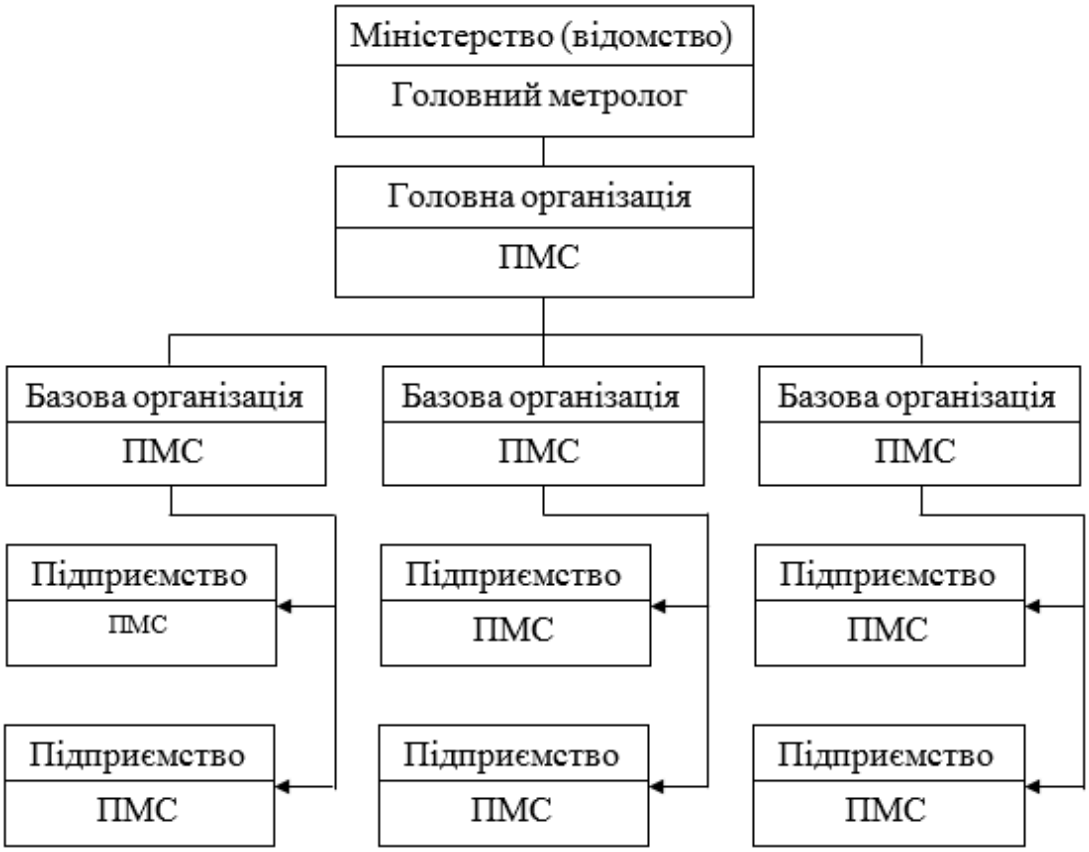


Рисунок 1.3 – Структура відомчої метрологічної служби
(ПМС – підрозділ метрологічної служби)

Головна та базові організації відомчої метрологічної служби визначаються міністерством (відомством) за узгодженням з Держстандартом із провідних науково-дослідних, проектно-конструкторських і технологічних організацій міністерства (відомства).

Головна організація відомчої метрологічної служби здійснює організаційне та науково-методичне керівництво роботами базових організацій метрологічної служби та метрологічних служб підприємств із метрологічного забезпечення під час розробки, виробництва, випробування та експлуатації продукції.

Базова організація відомчої метрологічної служби забезпечує організаційне та науково-методичне керівництво роботами із метрологічного забезпечення закріплених за нею підприємств, груп продукції чи видів діяльності.

Метрологічна служба підприємства здійснює комплекс робіт із метрологічного забезпечення під час розробки, виготовлення, випробування та експлуатації продукції та іншої діяльності на певному промисловому підприємстві чи у організації.

До складу метрологічної служби підприємства входить відділ головного метролога та метрологічні пункти в цехах, відділах і лабораторіях. Типові структури метрологічних служб промислового підприємства та науково-дослідних, проектно-конструкторських та технологічних організацій зображено на рисунках 1.4 і 1.5.

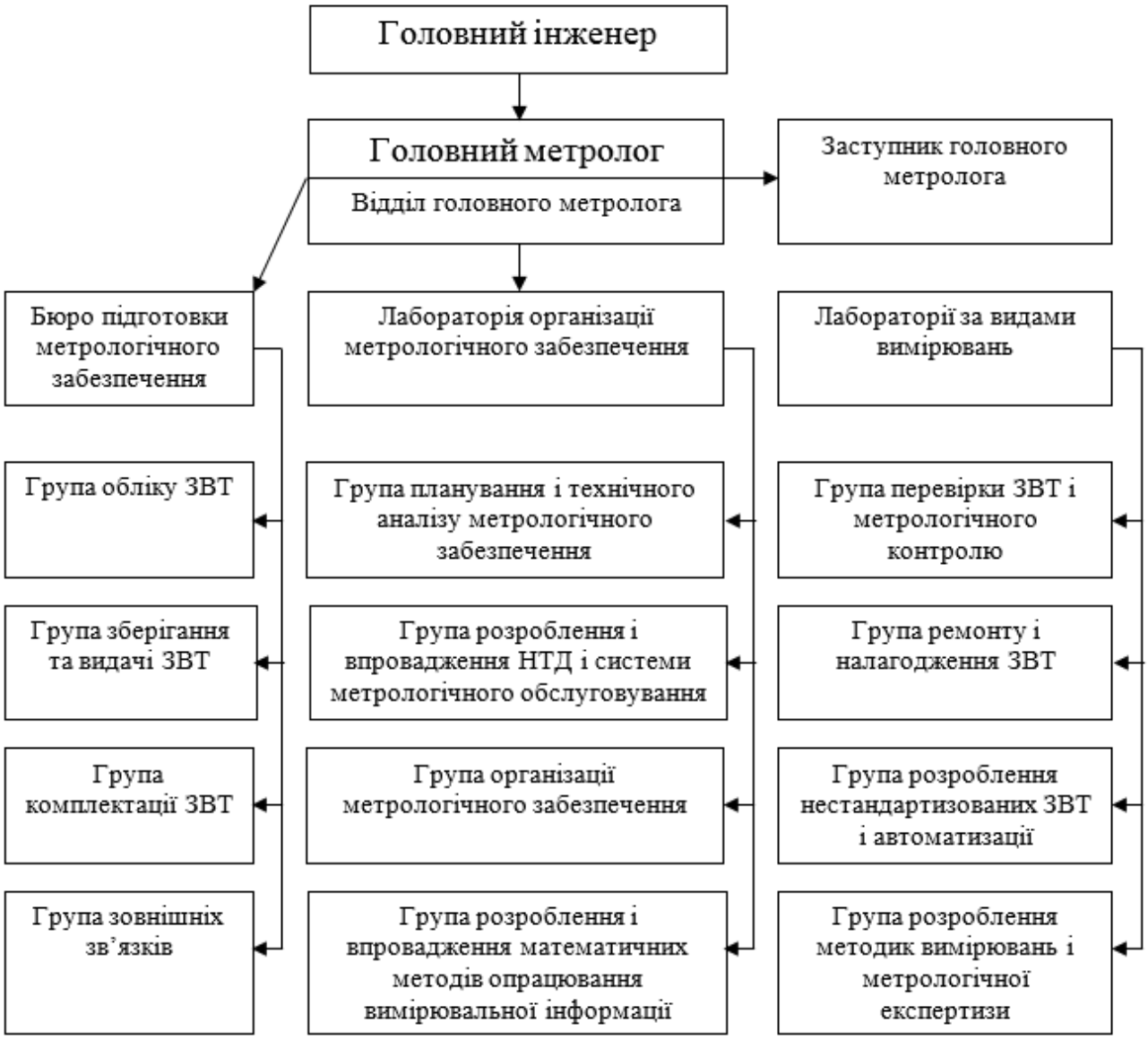


Рисунок 1.4 – Структура метрологічної служби промислового підприємства

Відділ головного метролога керує роботами із метрологічного забезпечення у цехах, відділах і лабораторіях, а також безпосередньо виконує роботи із метрологічного забезпечення на підприємстві. Головний метролог призначається наказом директора підприємства, підпорядковується його заступникові або головному інженерові і відповідає за виконання метрологічною службою підприємства покладених на неї завдань.

Метрологічна служба підприємства працює під методичним керівництвом базової організації та у тісній взаємодії з основними структурними підрозділами підприємства. До основних завдань метрологічної служби підприємства належать:

– забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань;

– впровадження в практику сучасних методів і засобів вимірювань, спрямованих на підвищення рівня наукових досліджень, ефективності виробництва, технічного рівня та якості продукції;

– організація та виконання перевірок і ремонту ЗВТ, які використовуються на підприємстві;

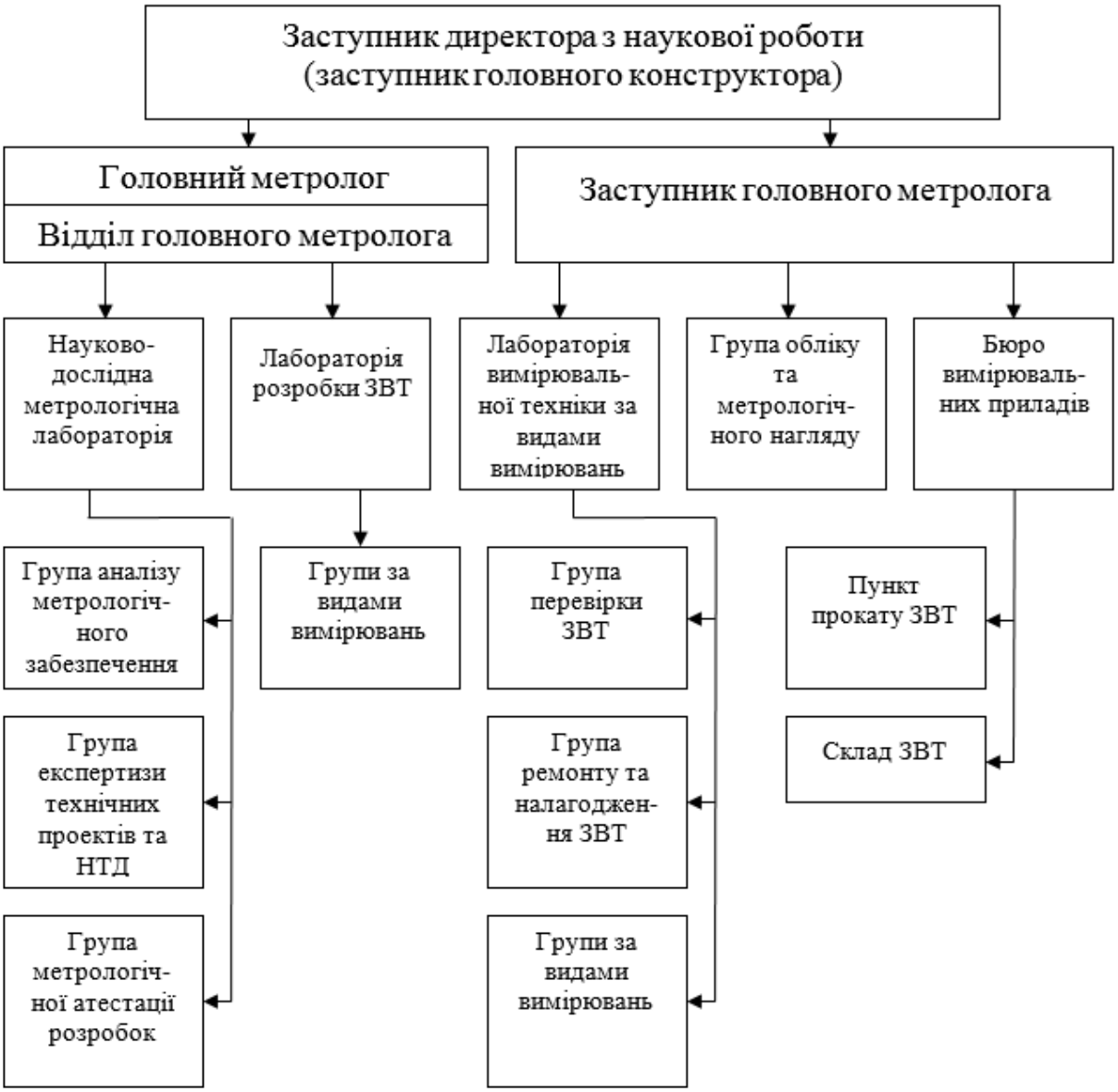


Рисунок 1.5 – Структура метрологічної служби науково-дослідної, проектно-конструкторської та технологічної організацій

– здійснення метрологічної експертизи технічних завдань, проектної, конструкторської та технологічної документації;

– виконання метрологічної атестації ЗВТ, які не підлягають державним випробуванням;

– здійснення метрологічного контролю за розробленням, станом, застосуванням і ремонтом ЗВТ, за впровадженням і дотриманням метрологічних правил, норм і вимог на підприємстві.

1.6 Метрологічний контроль і нагляд за засобами вимірювальної техніки

Метрологічний контроль і нагляд за засобами вимірювальної техніки (ЗВТ) в Україні здійснюється згідно із «Законом України про метрологію та метрологічну діяльність». Система метрологічного контролю і нагляду за ЗВТ

являє собою комплекс правил, положень і вимог технічного, економічного та правового характеру, що визначають порядок здійснення робіт з державних випробувань і метрологічної атестації, метрологічної перевірки, метрологічної ревізії та експертизи засобів вимірювальної техніки.

Метрологічний нагляд за ЗВТ в Україні здійснюється у формі державного метрологічного контролю і нагляду та метрологічного контролю і нагляду, який здійснюють метрологічні служби центральних органів виконавчої влади, підприємств і організацій, тобто так званого відомчого метрологічного контролю і нагляду за ЗВТ, який необхідний для забезпечення єдності вимірювань як необхідної умови підвищення ефективності виробництва, технічного рівня та якості продукції.

Державний метрологічний контроль і нагляд за ЗВТ являє собою систему контролю за виробництвом, технічним станом, застосуванням і ремонтом ЗВТ та дотриманням метрологічних правил та норм і здійснюється державною метрологічною службою у формі:

– державних приймальних і контрольних випробувань ЗВТ згідно з ДСТУ 3215-95;

– державної метрологічної перевірки ЗВТ згідно з ДСТУ 2708-99;

– реєстрації підприємств і організацій, що виготовляють, ремонтують і перевіряють ЗВТ;

– перевірок стану і застосування ЗВТ, діяльності відомчих метрологічних служб у міністерствах (відомствах) і на підприємствах, впровадження та дотримання метрологічних правил, норм і вимог.

Відомчий метрологічний контроль і нагляд за ЗВТ – це контроль відомчої метрологічної служби за технічним станом, застосуванням і ремонтом ЗВТ, дотриманням метрологічних правил, норм і вимог на підприємствах та організаціях міністерства (відомства). Основними формами відомчого метрологічного контролю є:

– відомча метрологічна атестація ЗВТ згідно з ДСТУ 3215-95;

– відомча метрологічна перевірка ЗВТ згідно з ДСТУ 2708-99;

– перевірка технічного стану і застосування ЗВТ, впровадження і дотримання метрологічних правил, норм і вимог на підприємствах системи міністерства (відомства);

– атестація випробувальних та аналітичних лабораторій на підприємствах системи міністерства (відомства) згідно з Р 50-062-95.

До основних функцій метрологічного контролю і нагляду за ЗВТ належать: державні випробування ЗВТ, метрологічна атестація, метрологічна перевірка, метрологічна ревізія та метрологічна експертиза ЗВТ.

Всі ЗВТ, що випускаються серійно або імпортуються партіями з-за кордону, підлягають державним випробуванням, які передбачають: експертизу технічної документації на ЗВТ та їх експериментальні дослідження для виявлення відповідності нормам і вимогам НТД на них, а також потребам народного господарства, сучасному рівню розвитку приладобудування та доцільності їх виробництва.

Засоби вимірювальної техніки, які не підлягають державним випробуванням, наприклад, дослідні та експериментальні зразки ЗВТ, що виготовляються під час виконання науково-дослідних робіт, піддаються метрологічній атестації, до якої входять: встановлення переліку метрологічних характеристик ЗВТ, які підлягають контролю під час метрологічної перевірки; експертиза методики перевірки ЗВТ, яка здійснюється згідно з ДСТУ 3215-95; визначення метрологічних характеристик ЗВТ і встановлення їх відповідності нормам НТД.

Якщо результати державних випробувань чи метрологічної атестації ЗВТ позитивні, оформляється акт або свідоцтво за відповідною формою, які дозволяють застосування цього ЗВТ.

Метрологічна перевірка засобів вимірювальної техніки – це встановлення придатності ЗВТ до використання за призначенням на основі експериментального визначення його метрологічних характеристик і контролю їх відповідності встановленим нормам НТД на ЗВТ. Перевірці підлягають усі ЗВТ, що випускаються з виробництва та ремонту, знаходяться в експлуатації та на зберіганні, а також імпортовані.

Метрологічна ревізія полягає у перевірці стану та застосування ЗВТ, дотримання метрологічних правил, норм і вимог у діяльності відомчих метрологічних служб. Як форма контролю за повсюдним дотриманням єдності вимірювань метрологічна ревізія передбачає також контроль за забезпечуваністю засобами вимірювальної техніки, технологічних процесів, відповідністю використовуваних методів і засобів вимірювань сучасним вимогам виробництва, правильністю виконання вимірювальних операцій, технічним рівнем нових ЗВТ тощо.

Метрологічна ревізія здійснюється органами Держстандарту України на підприємствах, що виготовляють, ремонтують чи експлуатують ЗВТ, і в організаціях, які їх зберігають і продають. Результати метрологічної ревізії оформляються актом, який містить конкретні результати перевірки, а також рекомендації та пропозиції щодо усунення виявлених недоліків і вдосконалення метрологічного забезпечення.

Метрологічна експертиза – це аналіз і оцінювання оптимальності технічних рішень щодо реалізації питань метрологічних вимог, правил і норм, передовсім пов’язаних з єдністю та точністю вимірювань. Розрізняють метрологічну експертизу документації (технічних завдань, програм, конструкторських і технологічних документів тощо) і метрологічну експертизу об’єктів. Метрологічна експертиза здійснюється, якщо виникають спірні питання щодо оцінювання стану ЗВТ, методів і засобів їх перевірки, правильності застосування та виконується особами – уповноваженими органів Держстандарту України.

1.7 Міжнародні метрологічні організації

Розвиток міжнародного науково-технічного співробітництва та міжнародної торгівлі неможливі без уніфікації та стабільності мір та ваг. У 1875 році сімнадцять розвинених країн Європи та Америки підписали Міжнародну

метричну конвенцію, (ММК), метою якої було сприяння міжнародній єдності мір. Тоді ж було створено Міжнародне бюро мір і ваг (МБМВ), програми наукової і практичної діяльності якого затверджує Генеральна конференція з мір і ваг (ГКМВ). У ній беруть участь відомі фізики та метрологи країн світу. Генеральна конференція з мір і ваг збирається один раз на шість років і є вищим міжнародним органом з питань встановлення та дотримання єдності фізичних величин.

Діяльність МБМВ, ММК і Генеральної конференції з мір і ваг охоплює практично всі галузі вимірювань. Регулярне порівняння, атестація та градуювання державних еталонів держав світу, які виконуються МБМВ, забезпечують єдність вимірювань у міжнародному масштабі.

Проникнення метрології у всі галузі науки і техніки привело до створення великої кількості НТД, які регламентують метрологічні роботи. Однак міжнародне співробітництво ускладнюється неузгодженістю, а часто суперечливістю НТД, що діють у різних країнах. Щоб уникнути цього, у 1956 році була створена Міжнародна організація законодавчої метрології (МОЗМ). Діяльність цієї міжурядової організації спрямована на уніфікацію законів, що стосуються метрологічної служби в державах-членах МОЗМ, на забезпечення єдності вимірювань.

Рекомендації МОЗМ щодо класифікації норм точності, границь вимірювань, термінології, характеристик ЗВТ використовуються в країнах світу під час розроблення державних стандартів та інших НТД.

До міжнародних метрологічних організацій належать Міжнародна конференція з вимірювальної техніки (ІМЕКО), до складу якої входить Технічний комітет з метрології.

Крім цього, питання метрології вирішуються також і неметрологічними міжнародними організаціями. Наприклад, у межах Міжнародної організації із стандартизації (ІСО), Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК), Європейської організації контролю якості, в складі якої створено технічний комітет із метрологічного забезпечення якості тощо. Зокрема, в ІСО затверджуються вихідні положення в галузі метрології, на яких базуються всі державні стандарти.

1.8 Еталони одиниць фізичних величин

Однією із умов забезпечення єдності вимірювань є тотожність одиниць, в яких проградуйовані всі ЗВТ, що використовуються для вимірювання однієї і тієї самої фізичної величини. Це досягається точним відтворенням та зберіганням встановлених одиниць фізичних величин і передаванням їх розмірів відповідним ЗВТ.

Відтворення та зберігання одиниць вимірювань (одиниць фізичних величин) для передачі їх розмірів засобам вимірювальної техніки, які застосовують на території України, забезпечується державними еталонами.

Еталон – засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини, а також передачу розміру цієї одиниці іншим засобам вимірювальної техніки.

За точністю відтворення одиниці фізичної величини та за призначенням

еталони поділяють на первинні, спеціальні та вторинні.

Розрізняють також державні, національні та міжнародні еталони.

Еталон, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини з найвищою у країні точністю, називається первинним.

Для відтворення одиниць в особливих умовах, в яких пряму передачу розміру одиниці від первинного еталона з необхідною точністю технічно здійснити неможливо, наприклад, при високому тиску чи температурі, високих і надвисоких частотах, крайніх ділянках діапазону вимірювання тощо, створюють і затверджують спеціальні еталони.

Еталон, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниць фізичної величини з найвищою точністю в особливих умовах і замінює в цих умовах первинний еталон, називається спеціальним. Фактично спеціальний еталон є різновидом первинного. Первинні та спеціальні еталони є вихідними для країни і їх затверджують як державні.

Державний еталон – це офіційно затверджений еталон, що забезпечує відтворення одиниці фізичної величини та передачу її розміру іншим еталонам з найвищою в країні точністю.

Еталон, якому передається розмір одиниці фізичної величини від первинного або спеціального еталона, називається вторинним.

До вторинних еталонів належать еталони-копії, робочі еталони та еталони передавання.

Еталон-копія – вторинний еталон, призначений для передачі розміру одиниці фізичної величини робочим еталонам, які використовуються для метрологічної перевірки зразкових та найточніших робочих ЗВТ.

Робочий еталон – вторинний еталон, призначений для передачі розміру одиниці фізичної величини зразковим ЗВТ, а в окремих випадках – робочим ЗВТ. Робочі еталони використовуються для метрологічної перевірки та калібрування ЗВТ.

Вторинний еталон, призначений для взаємного звіряння еталонів, які за тих чи інших обставин не можуть бути звірені безпосередньо, називається еталоном передавання.

За складом еталони можуть бути виконані у вигляді комплексу ЗВТ одиничних еталонів, групових еталонів та еталонних наборів.

Державні еталони реалізують як комплекси ЗВТ, які забезпечують відтворення, зберігання та передачу розмірів одиниць фізичних величин з найвищою у країні точністю.

Одиничний еталон являє собою одну міру, один вимірювальний прилад або одну вимірювальну уставку, а груповий еталон для підвищення надійності складається з однотипних мір чи інших ЗВТ і відтворює розмір одиниці фізичної величини як середнє арифметичне. Елементи групового еталона можуть бути використані як одиничні робочі еталони. Еталонним набором називають набір ЗВТ (мір, вимірювальних приладів тощо), який уможливлює відтворення, зберігання та передачу розміру одиниці фізичної величини, а також її вимірювання в певному діапазоні. Розрізняють групові еталони та еталонні набори сталого або змінного складу, тобто з періодичною зміною елементів.

Еталон певної країни називається національним, а еталони, що використовуються у певній групі країн – міжнародними. Згідно з ДСТУ 2681-94 міжнародним називають еталон, який за міжнародною угодою призначений для узгодження розмірів одиниць, що відтворюються і зберігаються державними (національними) еталонами.

Отже, для забезпечення єдності вимірювань у міжнародному масштабі державні еталони окремих країн періодично звіряють між собою і з міжнародними еталонами, які зберігаються в Міжнародному бюро мір і ваг у Парижі.

Складність різних еталонів і точність відтворюваних ними розмірів неоднакова. Виконання вимірювання або кількісне встановлення значення контрольованої величини передбачає прийняття за еталон одного певного значення цієї самої величини. Не передбачено таких еталонів для всіх контрольованих величин. Для того, щоб уникнути використання занадто великої кількості еталонів, головними вважають лише деякі з них, які названі основними (базисними), а решта – похідними. Кількість необхідних базисних еталонів випливає із кількості основних, взаємонезалежних величин певної галузі, та з кількості рівнянь, що описують цю галузь. Наприклад, у механіці, еталонні одиниці якої прийнято найраніше, базисними величинами вибрано довжину, масу та час. Одиницями, що їх описують, є відповідно метр (м), грам (г) та секунда (с). У електромагнетизмі, описуваному рівняннями Максвелла, необхідно користуватися чотирма базисними величинами, три з яких механічні й додано четверту – електричну. Нею в системі СІ є електричний струм з його одиницею – ампером (А).

У зв’язку з можливістю прийняття різних базисних величин раніше пропонувалось багато варіантів. Більшість з них характеризувалась певними недоліками, як, наприклад, вираження тих самих величин за допомогою різних одиниць, введення коефіцієнтів тощо. Щоб їх уникнути, розроблена і впроваджена міжнародна система (System International) одиниць, утворена на основі семи базисних одиниць: метр, грам, секунда, ампер, кандела, кельвін та моль, а також двох допоміжних – радіан і стерадіан.

Ця система забезпечує цілісну метрологічну єдність всіх сучасних галузей науки й техніки. Вона визнана практично у всіх цивілізованих країнах.

Сьогодні з-поміж цих семи базисних одиниць системи СІ лише один – еталон маси – є технологічною конструкцією. Метр та секунда визначені безпосередньо з частотних характеристик внутрішньоатомних процесів, а ампер, моль, кельвін та кандела існують як моделі якісно відтворюваних фізичних явищ.

Порівнювання вимірюваної величини з умовно прийнятою одиницею є трудомісткою справою. Створюють штучні еталони-взірці, підбирають природні явища, які відтворюють прийняті одиниці чи їх кратність. Від взірців вимагається достатня стабільність конкретної величини, її добра відтворюваність, простота використання (порівнювання) за допомогою вживаних методик та приладів. Коли застосовуються для порівняння допоміжні джерела енергії, то таке джерело не повинне впливати на метрологічну ціну чи вагу еталона.

Еталон, що повинен відтворювати конкретну величину, переважно

конструюється як взірець її похідного значення для полегшення виконання та вимірювання цієї величини. Порівняння з взірцями вважається тим складнішим та трудомісткішим, чим вища їх точність. Тому конструюють взірці різних класів точності, причому на найвищому рівні знаходиться переважно один або невелика група взірців, що підлягають самоперевірці або ж виготовлені з найвищою точністю; внизу метрологічної «піраміди» помішують значно більшу кількість взірців нижчих класів точності, які, проте, дають змогу здійснювати швидше та простіше порівнювання з контрольованою величиною, з одного боку, та з взірцем вищого рангу з іншого боку.

Отже, визначимо основне завдання метрологічної служби держави. Ним вважається пов'язування еталона й взірців усіх рангів у стрункy систему, покликану забезпечувати метрологічну єдність виконання вимірювань з необхідною та заданою точністю (похибкою).

Контрольні питання

1. Що таке метрологія та єдність вимірювань?
2. Як забезпечується єдність вимірювань?
3. Що таке метрологічне забезпечення? Що є правовою системою метрологічного забезпечення?
4. Що являє собою Державна система забезпечення єдності вимірювань?
5. Що являє собою система метрологічного контролю і нагляду за засобами вимірювальної техніки?
6. Поясніть суть основних метрологічних операцій – метрологічної атестації, метрологічної перевірки та метрологічної ревізії, здійснюваних над засобами вимірювальної техніки під час метрологічного контролю і нагляду за ЗВТ.
7. Яка структура метрологічної служби України?
8. Які основні функції Державної метрологічної служби?
9. Де можуть організовуватись і які основні функції відомчих метрологічних служб?
10. Які є види еталонів одиниць фізичних величин?

ТЕМА 2
МЕТОДИ ВИМІРЮВАНЬ, СТАТИЧНІ ТА ДИНАМІЧНІ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ

План

2.1 Класифікація вимірювань.
2.2 Принцип і метод вимірювання.
2.3 Класифікація методів вимірювань.
2.4 Похибки вимірювань.
2.5 Статичні характеристики.
2.6 Динамічні характеристики.
2.7 Похибки вимірювальних пристроїв.

2.1 Класифікація вимірювань

Суть вимірювання полягає у порівнянні вимірюваної величини з деяким її значенням, прийнятим за одиницю. Будь-яке вимірювання здійснюється за допомогою обов'язкового виконання фізичного експерименту, в якому взаємодіють об'єкт вимірювання і засоби вимірювальної техніки, а також, якщо необхідно, виконанням певних обчислювальних процедур над отриманими результатами.

Вимірювання можна характеризувати з різних сторін, враховуючи їх різні ознаки. Основні класифікаційні ознаки вимірювань відображено на рисунку 2.1.

За фізичним принципом, покладеним в основу вимірювання, а також залежно від галузі науки і технології розрізняють електричні, магнітні, механічні, акустичні, оптичні, квантові, хімічні та інші вимірювання.

За способом порівняння з мірою розрізняють такі (методи) вимірювань: безпосереднього оцінювання, порівняння з мірою та комбіновані.

За способом отримання результату розрізняють прямі та непрямі вимірювання, а останні розділяють на опосередковані, сумісні та сукупні вимірювання.

За кількістю опрацьовуваних первинних результатів розрізняють разові (однократні) та багаторазові (багатократні) вимірювання.

За характером взаємодії ЗВТ з об'єктом дослідження розрізняють контактні та безконтактні вимірювання.

За характером зміни величин та показів вимірювальних засобів розрізняють статичні та динамічні вимірювання.

За докладністю оцінювання точності результатів вимірювань розрізняють технічні, лабораторні, науково-дослідні та метрологічні (еталонні) вимірювання.

Разові вимірювання виконують за умови стабільних показів засобів вимірювань, тобто при невеликих змінних похибках (систематичних і випадкових). Щоб переконатись у стабільності показів, зазвичай здійснюють декілька спостережень (3-4), і як результат вибирають один з них, не виконуючи якогось опрацювання.

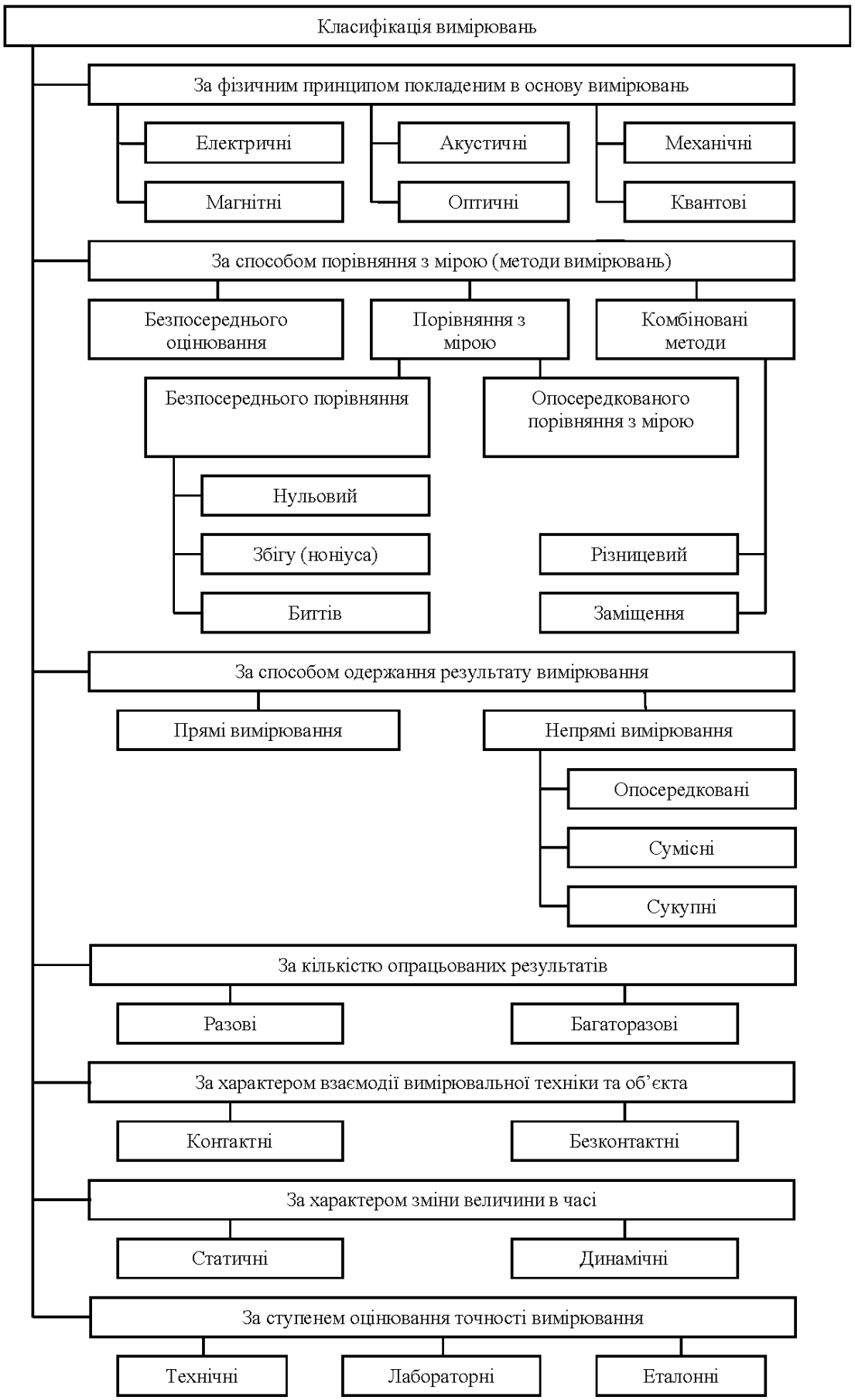


Рисунок 2.1 – Класифікація вимірювань

Багаторазові вимірювання здійснюють, коли покази засобів вимірювань є нестабільними і розходження між ними перевищують допустимі границі, що встановлюються згідно з класами точності та іншими метрологічними характеристиками. Причинами нестабільності показів переважно є вплив змінних похибок, наприклад, від впливу періодичних завад чи швидкої зміни параметрів вимірювального кола, наприклад, розряд батареї живлення тощо, а також від дії випадкових шумів та завад різної природи.

Під час багаторазових вимірювань кількість первинних вимірювань становить від 3-4 і аж до мільйонів. Усереднюючи отримані результати (чи використовуючи інші статистичні методи), забезпечують підвищення точності вимірювань завдяки взаємній компенсації складових змінних похибок.

Багаторазові вимірювання виконують також для визначення певних характеристик (параметрів) сигналів і полів, таких, як середнє значення, середнє за модулем і середньоквадратичне значення, градієнт тощо, а також для спектрального (частотного) аналізу сигналів тощо.

Багаторазові вимірювання для зменшення впливу випадкових похибок або для визначення статистичних параметрів випадкових процесів (сигналів) називають статистичними вимірюваннями.

Вимірювання називають контактним, якщо ЗВТ має безпосередній механічний контакт з досліджуваним об’єктом.

Безконтактні (дистанційні) вимірювання – це вимірювання, під час яких не відбувається безпосереднього механічного контакту ЗВТ з досліджуваним об’єктом, а вимірювальна інформація про стан об’єкта одержується за допомогою використання різних випромінювань: оптичних, акустичних, теплових, іонізаційних, електромагнітних тощо. Теоретично такі випромінювання також у певний спосіб впливають на об’єкт, наприклад, акустичні випромінювання створюють тиск на досліджувану поверхню, однак такий вплив є набагато меншим, ніж у разі контактних вимірювань, хоча в певних вимірюваннях необхідно також враховувати взаємодію ЗВТ з об’єктом через випромінювання.

Статичні вимірювання – це вимірювання величини, яку можна вважати незмінною за час вимірювання, або характеристики зміни величини відповідають динамічним властивостям ЗВТ. Наприклад, вимірювання діаметра, довжини, маси стержня.

Динамічні вимірювання – це вимірювання величини, яка змінюється протягом вимірювального експерименту або характеристики зміни цієї величини не відповідають динамічним властивостям ЗВТ. Наприклад, вимірювання температури під час розігріву пічки (змінюється вимірювана величина – температура), або вимірювання сталої температури відразу після розміщення терморезистивного перетворювача у досліджуване середовище – вплив інерційності вимірювального перетворювача, внаслідок чого опір перетворювача ще не досяг усталеного значення.

Технічні вимірювання – це типові вимірювання на об’єктах із застосуванням наперед заданих ЗВТ, вимірювальних схем відповідно до конкретної методики вимірювань. Як правило, у таких вимірюваннях спеціально не оцінюються характеристики точності результатів, оскільки вони закладені ще

на етапі планування таких вимірювань у відповідній метрологічній установці, з урахуванням використовуваних ЗВТ та умов вимірювань. Наприклад, вимірювання параметрів генератора електричної станції (лінійні та фазові напруги, струми, частота, потужність тощо) під час його роботи.

Науково-дослідні (лабораторні) вимірювання – такі вимірювання здійснюють, досліджуючи фізичні закономірності в різних об'єктах довкілля, зокрема, створюючи нові технології і засоби вимірювальної техніки. Переважно це нетипові вимірювання, за яких необхідно спеціально планувати вимірювальний експеримент, розробляти вимірювальну схему, обґрунтовувати вибір ЗВТ (зокрема, їх характеристик точності), забезпечувати умови вимірювань та належне опрацювання результатів вимірювань з обов'язковим оцінюванням їх точності.

Метрологічні (еталонні) вимірювання – це вимірювання у метрологічних установках під час досліджень ЗВТ, створення нових методик вимірювань, під час метрологічних випробувань, контролю, атестації та експертизи при передаваннях розмірів одиниць фізичних величин тощо. Такі вимірювання здійснюються відповідно до строго регламентованих рекомендацій, сформульованих у відповідних нормативних документах, що часто мають статус стандартів.

Пряме вимірювання – це вимірювання однієї величини, в якому її значення одержують безпосередньо за показом відповідного приладу X_n, без необхідних для знаходження значення вимірюваної величини додаткових обчислень:

$$x = X_n. \tag{2.1}$$

Приклади прямих вимірювань: вимірювання сили струму – амперметром, довжини – лінійкою, інтервалу часу – годинником, температури – термометром, електричного опору – омметром (рис. 2.2, а) тощо. Значення вимірюваної величини вважається знайденим прямо, коли шкала вимірювального засобу проградуйована прямо у відповідних значеннях вимірюваної величини або опосередковано через таблицю чи графік. Наприклад, під час вимірювання опору (рис. 2.2, а) показ омметра Ω безпосередньо дає значення опору (R_x=R_Ω).

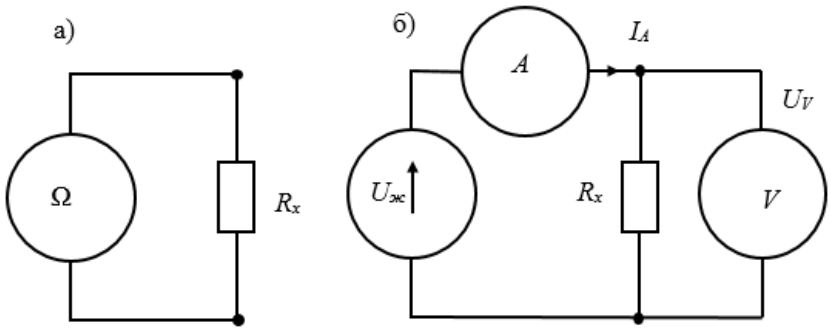


Рисунок 2.2 – Пряме та опосередковане вимірювання електричного опору

Вимірювання вважається також прямим і тоді, коли результат знаходять, опрацьовуючи результати спостережень без перетворення роду величини, тобто результат вимірювання і результат окремого спостереження – одного роду. Наприклад, якщо для розширення границь вимірювання амперметра застосовують

вимірювальний трансформатор струму, вольтметра – вимірювальний трансформатор напруги чи подільник напруги тощо. Результат вимірювання у такому разі є добутком масштабного коефіцієнта k_m відповідного масштабного перетворювача на показ приладу:

$$x = k_m X_n. \tag{2.2}$$

Вимірювання є прямим, навіть якщо необхідно виконати додаткові вимірювання впливових величин, наприклад, щоб зробити корекцію систематичних похибок.

Під час опосередкованих вимірювань значення величини Y знаходять за результатами безпосередніх вимірювань величин X_1, X_2, X_3, …, X_n, які пов'язані з нею функціональною залежністю:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, ..., X_n). \tag{2.3}$$

Якщо результати вимірювань аргументів позначити як x_1, x_2, ,x_3, ..., x_n, то результат опосередкованого вимірювання отримують, підставивши результати вимірювань величин-аргументів у відповідне рівняння вимірювання:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, ..., x_n). \tag{2.4}$$

Прикладом опосередкованого вимірювання є вимірювання опору R_x споживача за результатами прямих вимірювань струму I_A амперметром A та напруги вольтметром V при живленні схеми від джерела напругою $U_{ж}$ (рис. 2.2, б):

$$R_x = \frac{U_V}{I_A}. \tag{2.5}$$

Сукупними називають виконані одночасно вимірювання декількох однойменних величин, за яких шукані значення величини знаходять розв'язком системи рівнянь, одержуваних при прямих вимірюваннях різних різновидностей цих величин чи ряду інших величин, функціонально зв'язаних з вимірювальними.

Вказана система рівнянь у загальному випадку має вигляд:

$$\begin{aligned}
&F_1\left(X_1, X_2, ..., X_n,\ Y_1, Y_2, ..., Y_m,\ k_{11}, k_{12}, ..., k_{1j}, ..., k_{1m}\right) = 0,\\
&F_2\left(X_1, X_2, ..., X_n,\ Y_1, Y_2, ..., Y_m,\ k_{21}, k_{22}, ..., k_{2j}, ..., k_{2m}\right) = 0,\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&F_i\left(X_1, X_2, ..., X_n,\ Y_1, Y_2, ...Y_m,\ k_{i1}, k_{i2}, ..., k_{ij}, ..., k_{im}\right) = 0,\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&F_n\left(X_1, X_2, ..., X_n,\ Y_1, Y_2, ...Y_m,\ k_{n1}, k_{n2}, ..., k_{nj}, ..., k_{nm}\right) = 0,
\end{aligned} \tag{2.6}$$

де k_{ij} – відомі величини;

$Y_1, Y_2, ..., Y_m$ – однойменні величини, значення яких є шуканими;

$X_1, X_2, ..., X_n$ – величини, значення яких визначаються шляхом прямих вимірювань.

Для визначення *m* шуканих значень величин $Y_1, Y_2, ..., Y_m$ необхідно, щоб число рівнянь *n* було рівним чи більше числа невідомих *m.* Розв'язок системи (2.6) відносно кожної із шуканих величин $Y_1, Y_2, ..., Y_m$ являє собою функцію. Тому результат вимірювання кожної із величин можна розглядати як результат непрямого вимірювання.

Сумісними називають проведені одночасно вимірювання двох чи декількох неоднойменних величин для знаходження залежності між ними. У загальному випадку сумісні вимірювання можуть бути описані системою рівнянь (2.6). На відміну від сукупних вимірювань при сумісних вимірюваннях величини $Y_1, Y_2, ..., Y_m$ є неоднойменними. Метою сумісного вимірювання, як правило, є визначення функціональної залежності між величинами.

2.2 Принцип і метод вимірювання

Принцип вимірювання – це фізичний закон, ефект, явище, на яких ґрунтується вимірювання, тобто наукова основа вимірювання. Наприклад, вимірювання індукції магнітного поля на основі ефекту Холла, а інших параметрів магнітного поля – на основі застосування закону електромагнітної індукції, вимірювання температури на основі термоелектричного ефекту, вимірювання швидкості на основі ефекту Доплера тощо. Залежно від принципу розрізняють електричні та магнітні, акустичні та оптичні, механічні та хімічні, теплові та квантові та інші вимірювання.

Метод вимірювання – це загальна логічна послідовність операцій із засобами вимірювальної техніки, що виконують під час здійснення вимірювань згідно з певним принципом. Один і той самий метод вимірювання може бути застосований для вимірювання різних величин. Конкретна назва методу може залежати від принципу вимірювання. Так, якщо вимірювання електричного опору ґрунтується на використанні закону Ома, причому напругу вимірюють вольтметром, а силу струму – амперметром, то можна говорити про «метод амперметра – вольтметра» вимірювання електричного опору.

Очевидно, що з погляду принципів вимірювань існують різноманітні методи вимірювань величин, тому що існує велика кількість фізичних явищ, які є основою вимірювальних експериментів. Загалом кожне вимірювання передбачає порівняння величини з одиницею, яка відтворюється мірою. Отже, у кожному вимірюванні явно чи неявно присутня міра і тому залежно від наявності при вимірюванні міри як окремого засобу вимірювальної техніки можна виділити три групи методів: методи безпосереднього оцінювання, методи порівняння з мірою і комбіновані методи.

2.3 Класифікація методів вимірювань

Під методами безпосереднього оцінювання розуміють методи вимірювань, що ґрунтуються на застосуванні засобів вимірювань (приладів, систем, каналів чи установок) і, якщо необхідно, вимірювальних перетворювачів, а значення вимірюваної величини знаходять за їх показами:

$$x = X_n. \tag{2.7}$$

Наприклад, вимірювання сили електричного струму амперметром (рис. 2.3, а), чи температури – термометром (рис. 2.3, б). Це метод безпосереднього оцінювання, оскільки за показом амперметра ми безпосередньо робимо висновок про силу вимірюваного струму в колі, за показом термометра – про температуру в певному місці об’єкта.

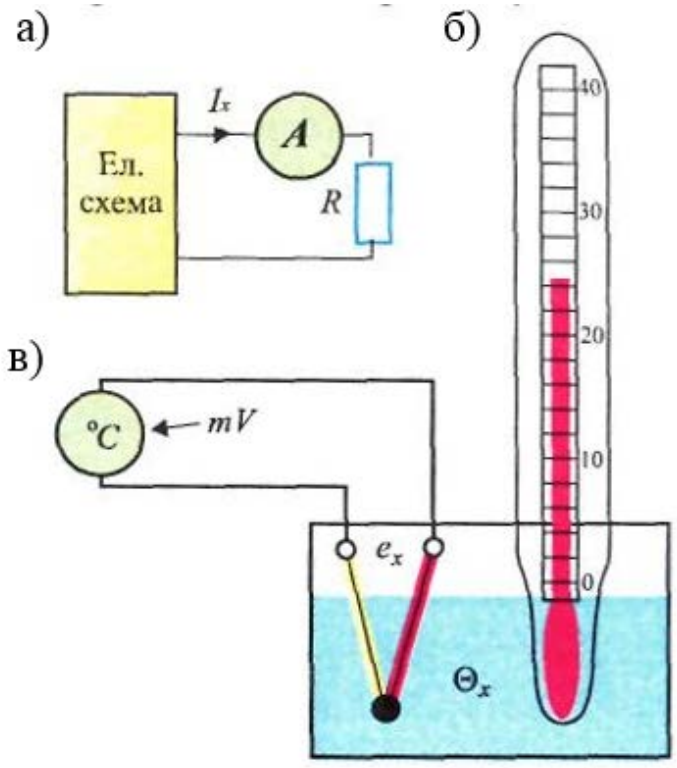


Рисунок 2.3 – Методи безпосереднього оцінювання

До методів безпосереднього оцінювання належать також вимірювання, у яких разом з вимірювальними приладами використовують вимірювальні перетворювачі.

Зокрема, вимірювання сили струму за допомогою амперметра і вимірювального трансформатора струму, що застосовується для розширення границь вимірювання амперметра, належить до методу безпосереднього оцінювання. Таким методом вимірювання є вимірювання температури за допомогою термоелектричного перетворювача та вторинного мілівольтметра, якщо шкала останнього проградуйована в одиницях температури (наприклад, за шкалою Цельсія) (рис. 2.3, в).

Кожне вимірювання повинно передбачати порівняння розміру вимірюваної величини з розміром величини, що відтворюється мірою. Тому в методах безпосереднього оцінювання наявність міри та операції порівняння обов'язкові. Однак для засобів вимірювань, зокрема вимірювальних приладів, міра виступає не як незалежний засіб вимірювальної техніки зі своїми нормованими метрологічними характеристиками, а тільки як складова частина, елемент приладу. Характеристики такої міри (як елемента приладу) враховані під час нормування метрологічних характеристик приладу як цілого. Під час виконання вимірювань і подальшого опрацювання результатів, зокрема під час оцінювання похибки вимірювання чи невизначеності результату вимірювання експериментатор не враховує (і не може врахувати) характеристики міри, а користується характеристиками всього приладу.

Методи порівняння з мірою – це методи, які ґрунтуються на обов'язковому використанні міри та пристрою порівняння (компаратора) як окремих ЗВТ і, якщо необхідно, вимірювальних перетворювачів, а значення вимірюваної величини встановлюють за показами міри при відповідному спрацюванні компаратора. Порівняння вимірюваної величини (можливо, перетвореної) з мірою може бути здійснене двома способами, за один раз – зіставленням ряду значень міри і вимірюваної величини (як і під час вимірювання довжини l_x =63 *см* за допомогою лінійки з поділками (рис. 2.4, а), тут компаратором служить око експериментатора) або за декілька кроків – через зрівноважування вимірюваної величини послідовними значеннями міри (як під час зважування на терезах (рис. 2.4, б).

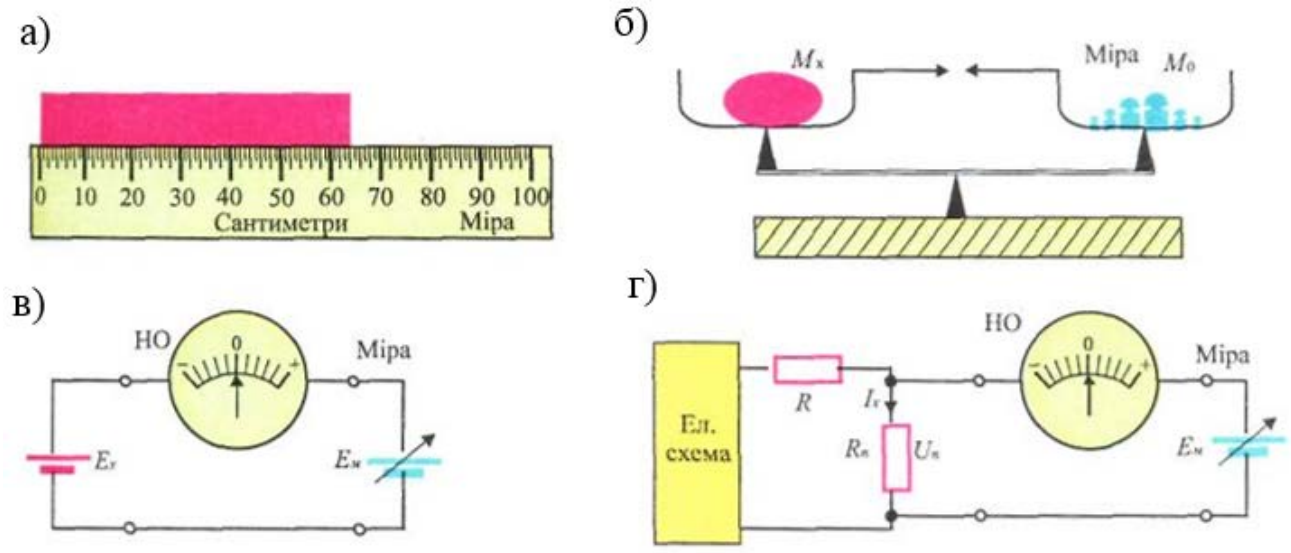


Рисунок 2.4 – Методи вимірювання на основі порівняння з мірою

У методі зрівноважування вихідну величину міри залежно від вихідного сигналу компаратора змінюють доти, доки вона не буде дорівнювати значенням вимірюваної величини. За результат вимірювання величини приймається показ регульованої міри:

$$x=X_m. \qquad (2.8)$$

Наприклад, на рисунку 2.4, (в) наведена реалізація методу порівняння з мірою зрівноважуванням для вимірювання ЕРС E. Регулюючи вихідну ЕРС E міри, досягають зрівноважування нею вимірюваної ЕРС E. Факт зрівноваження встановлюють за допомогою нульового показу індикатора (нуль-органа, НО) компаратора. За результат вимірювання приймають показ міри: $E_x=E_m$.

Оскільки на завершальному етапі зрівноважування забезпечується взаємна компенсація ефектів дії на компаратор як вимірюваної величини, так і величини, відтворюваної мірою, то такий метод часто називають компенсаційним методом вимірювання.

Крім того, оскільки результуючий ефект дії на компаратор обох величин під час зрівноважування доводять до нуля, то цей метод ще називають нульовим методом вимірювання.

Інколи ще застосовують назву метод протиставлення, оскільки вимірювана величина і вихідна величина міри ніби протиставляються одна одній.

Однак за своєю суттю і компенсаційний метод, і нульовий метод, і метод протиставлення – це різні назви, що відображають різні сторони методів порівняння з мірою. Головною особливістю методів порівняння з мірою є використання для вимірювання міри як засобу вимірювальної техніки. Її показ, а також інші метрологічні характеристики безпосередньо враховують, визначаючи результат вимірювання і оцінюючи його якість (оцінки похибки вимірювання чи невизначеності результату).

Якщо вихідна величина міри і вимірювана величина однорідні, то говорять, що здійснено вимірювання методом безпосереднього порівняння з мірою. Реалізація цього методу вимірювання забезпечує найвищу точність вимірювання, що визначається лише точністю міри та компаратора.

Для багатьох величин створення простої та високоточної регульованої міри, а також відповідного компаратора – пристрою порівняння, є важким завданням. Тому часто вимірювану величину попередньо перетворюють за допомогою вимірювального перетворювача (вимірювальних перетворювачів) в іншу величину, для якої створення міри та пристрою порівняння не становить особливих труднощів. У такому разі можна говорити про вимірювання методом опосередкованого порівняння з мірою. Наприклад, вимірюючи силу постійного електричного струму I_x, можна спочатку перетворити його за допомогою зразкового (еталонного) резистора R_n в напругу $U_x=I_x \cdot R_n$, яка після цього може бути виміряна безпосереднім порівнянням з мірою напруги (рис. 2.4, г).

Тут результат вимірювання струму знаходять як показ міри напруги E_m, поділеної на опір резистора: $I_x = E_m/R_n$. Точність вимірювання у такому разі визначається точністю міри, компаратора та зразкового (еталонного) резистора, тобто менша, ніж у методі безпосереднього порівняння з мірою.

Метод заміщення – це метод різночасового порівняння вимірюваної величини з мірою, в якому компаратором служить вимірювальний прилад (ВП), причому спочатку запам’ятовується ефект дії вимірюваної величини на ВП, а потім цей ефект відновлюється через дію на вхід приладу зразкової величини з виходу регульованої міри (рис. 2.5).

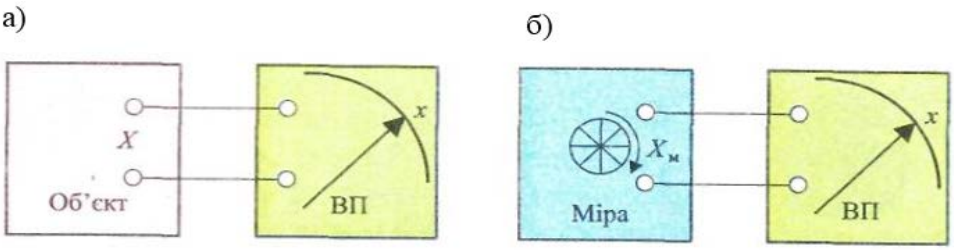


Рисунок 2.5 – До суті методу заміщення

За результат вимірювання приймається показ міри:

$$x = X_m \tag{2.9}$$

Цей метод забезпечує коригування систематичних похибок вимірювального приладу.

Суть комбінованого методу полягає в тому, що у вимірюванні беруть безпосередню участь як вимірювальний прилад, так і міра, а результат вимірюваної величини визначають за показами міри і приладу (рис. 2.6). Такі методи ще називають методами неповного зрівноважування та різницевими (диференційними) методами.

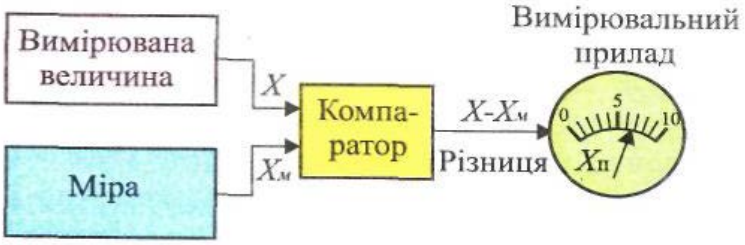


Рисунок 2.6 – Комбінований метод вимірювань

Результат вимірювання величини знаходять як алгебраїчну суму показів міри X_m та приладу X_n.

$$x=X_m+X_n. \tag{2.10}$$

Методи збігу використовуються для вимірювання величин простору (вимірювання довжини) чи часу (вимірювання інтервалів часу, періоду частоти) і полягають у тому, що різниця між ефектами, викликаними дією на компаратор вимірюваної та зразкової величин, визначається за збігом відповідних поділок шкал (вимірювання довжини) чи періодичних сигналів (вимірювання часових параметрів). Типовими прикладами такого методу вимірювань є вимірювання довжини штангенциркулем з ноніусом (метод ноніуса), метод подвійного збігу (коінциденції), а також вимірювання частоти стробоскопом (стробоскопічний метод).

Методика вимірювань, або, інакше, – вимірювальна процедура – послідовність операцій, які необхідно виконати з конкретними ЗВТ для вимірювання із заданою точністю певної величини згідно з методом та

принципом вимірювання. Методика вимірювання стосується вимірювання конкретної величини. Методика вимірювання звичайно оформляється у вигляді спеціального документа, який іноді називають «Методика виконання вимірювань» (МВВ). У цьому документі детально регламентуються застосовувані засоби вимірювальної техніки, їх підготовка до виконання вимірювань, умови вимірювань, самі вимірювальні операції, спосіб опрацювання результатів та їх подання. Оператор може виконувати вимірювання згідно з методикою без залучення додаткових засобів і використання додаткової інформації.

2.4 Похибки вимірювань

У процесі вимірювання одержують деяку оцінку значення фізичної величини в прийнятих одиницях, а істинне значення фізичної величини завжди залишається невідомим, через що не можна визначити істинне значення похибки вимірювання. Для наближеної оцінки похибки використовують поняття дійсного значення фізичної величини, яке знаходять більш точними методами і засобами. Одержувану оцінку похибки, що представляє собою різниця Δ між отриманим при вимірюванні і дійсним значеннями фізичної величини (тут і далі мається на увазі абсолютна похибка), залежно від причин виникнення, характеру й умов прояву прийнято виражати сумою двох складових, названих випадковою ψ і систематичною θ похибками вимірювань:

$$\Delta = \theta + \Psi . \qquad (2.11)$$

Класифікація похибок вимірювань наведена на рисунку 2.7.

Випадкова похибка вимірювання – це складова похибки вимірювання, що змінюється випадковим чином при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини.

Випадкова похибка визначається факторами, що виявляються нерегулярно із змінною інтенсивністю. Значення і знак випадкової похибки визначити неможливо, тому що в кожному дослідженні причини, що викликають похибку, діють неоднаково. Випадкова похибка не може бути виключена із результату вимірювань. Однак проведенням ряду повторних вимірювань і використанням для їхньої обробки методів математичної статистики визначають значення вимірювальної величини з випадковою похибкою, меншою, чим для одного вимірювання.

При організації статистичних вимірювань, для яких і визначається випадкова похибка, створюються умови, які характеризуються тим, що інтенсивність усіх діючих факторів доводиться до деякого рівня, що забезпечує більш-менш рівний вплив на формування похибки. У цьому випадку говорять про очікувану похибку (рис. 2.7). Крім цієї похибки можуть мати місце грубі похибки і промахи.

Грубою похибкою називають похибку вимірювання, істотно перевищуючу очікувану за даних умов. Причинами грубих похибок можуть бути несправність засобів вимірювань, різка зміна умов вимірювань і впливових величин.

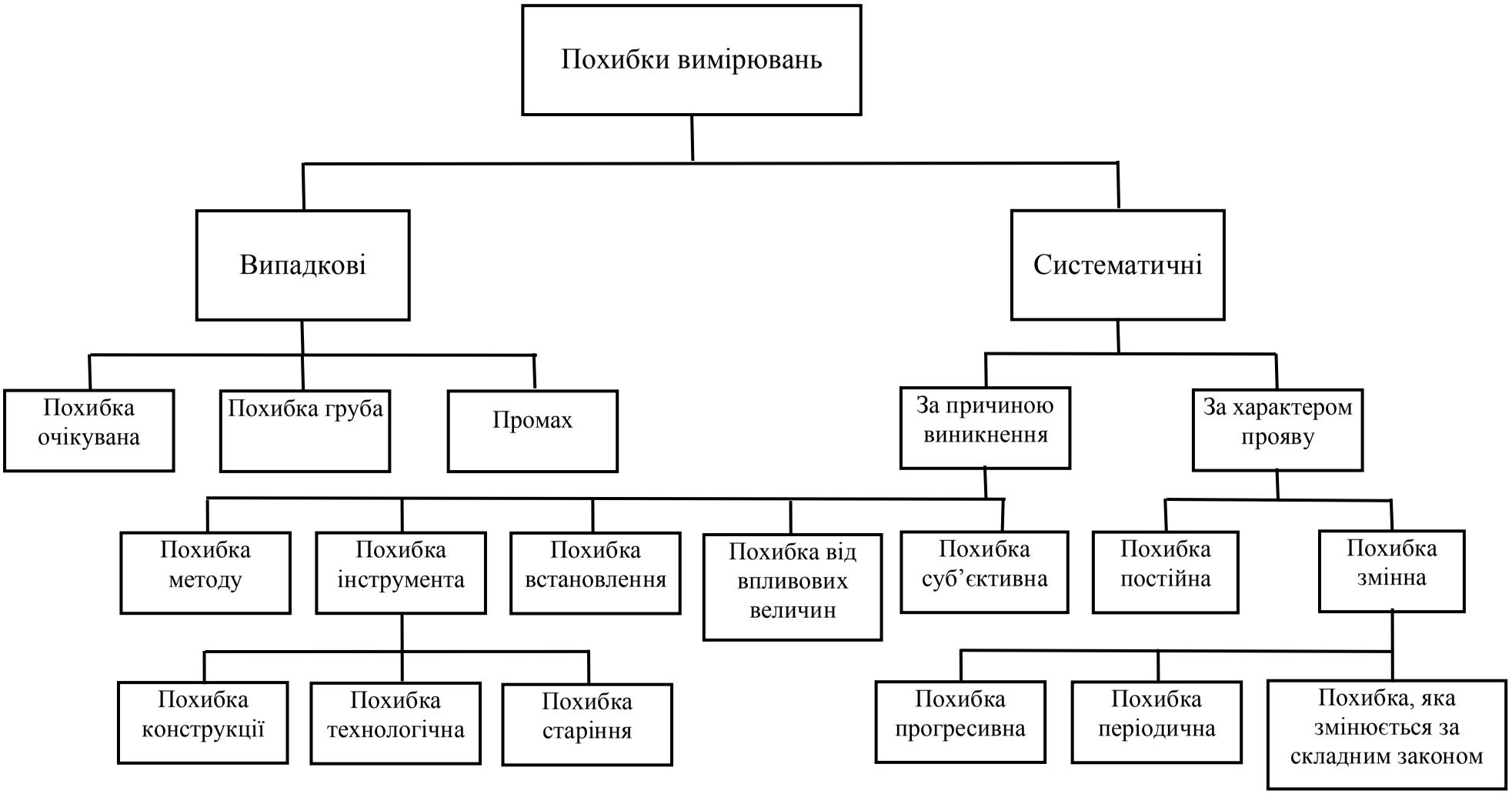


Рисунок 2.7 – Класифікація похибок вимірювання

Промах – це похибка вимірювання, що явно і різко спотворює результат. Промах є випадковою суб'єктивною помилкою. Його поява – наслідок неправильних дій експериментатора.

Грубі похибки і промахи зазвичай виключаються з експериментальних даних, що підлягають обробці.

Окреме значення випадкової похибки передбачити неможливо. Сукупність же випадкових похибок якогось вимірювання однієї і тієї ж величини підкоряється визначеним закономірностям, що є ймовірнісними. Вони описуються в метрології за допомогою методів теорії ймовірностей і математичної статистики. При цьому фізичну величину, результат вимірювання якої містить випадкову похибку, і саму випадкову похибку розглядають як випадкову величину.

Для кількісної оцінки об'єктивної можливості появи того чи іншого значення випадкової величини служить поняття ймовірності, яку виражають у частках одиниці (ймовірність достовірної події дорівнює 1, а ймовірність неможливої події – 0).

Математичний опис неперервних випадкових величин здійснюється зазвичай за допомогою диференціальних законів розподілу випадкової величини. Ці закони визначають зв'язок між можливими значеннями випадкової величини (похибки) і відповідними їм щільностями ймовірностей (неперервною вважають випадкову величину, що має нескінченну множину значень, одержати які можна тільки при нескінченному числі вимірювань).

Найбільш поширеним при вимірюваннях є нормальний закон розподілу. Для деякої вимірювальної величини X крива 1 розподілу щільності ймовірності $p(X)$ для закону нормального розподілу має вигляд, показаний на рисунку 2.8, (а). При цьому щільність ймовірності (чи щільність розподілу) характеризує щільність, з якою розподіляються значення випадкової похибки в даній точці. Щільність ймовірності для закону нормального розподілу описується рівнянням:

$$p(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-M[X])^2}{2\sigma^2}}, \qquad (2.12)$$

де $M[X]$ і σ – характеристики нормального розподілу.

Криву 1 (рис. 2.8, а) можна розглядати як криву 1 розподілу випадкової похибки (рис. 2.8, б), переносячи початок координат у точку $X=M[X]$. У цьому випадку щільність ймовірності:

$$p(\psi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-0,5(\psi/\sigma)^2}, \qquad (2.13)$$

де $\psi=X-M[X]$ – випадкова похибка.

Характеристики $M[X]$ і σ називають відповідно математичним очікуванням і середньоквадратичним відхиленням. Вони є важливими числовими характеристиками випадкової величини.

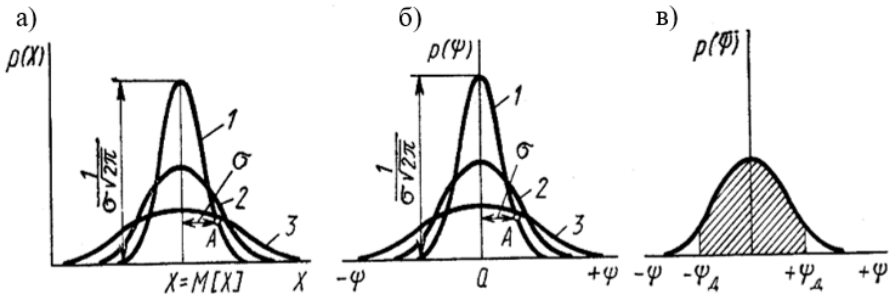


Рисунок 2.8 – Криві нормального розподілу випадкових величин та їх випадкових похибок

Математичне очікування є тим значенням величини, навколо якого групуються результати окремих спостережень (рис. 2.8), а середньоквадратичне відхилення характеризує розсіювання результатів окремих спостережень відносно математичного очікування, тобто форму кривої розподілу щільності ймовірності, площа під якою завжди дорівнює одиниці. На рисунку показані криві закону нормального розподілу (криві Гауса) випадкової величини X (рис. 2.8, а) та її випадкової похибки ψ (рис. 2.8, б) при різних значеннях середньоквадратичного відхилення; розсіювання для кривої 3 більше, ніж розсіювання для кривої 2, а розсіювання для кривої 2 – більше, ніж для кривої 1.

Геометрично σ визначається як відстань від осі симетрії нормального розподілу до точки А перегину кривої розподілу (рис. 2.8, а, б).

Щоб визначити ймовірність P попадання результату вимірювання чи випадкової похибки в якийсь наперед заданий інтервал від $-\psi_\partial$ до $+\psi_\partial$ (рис. 2.8, в), необхідно знайти площу під кривою розподілу, обмежену вертикалями на границі інтервалу. Для нормального розподілу:

$$P = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\psi_\partial}^{+\psi_\partial} e^{-0{,}5(\psi/\sigma)^2} d\psi \,. \qquad (2.14)$$

Розв’язати інтеграл (2.14) аналітично неможливо. Зазвичай він приводиться у вигляді таблиць, що дозволяють визначити його значення наближено в частках одиниці. Частіше розв’язується зворотна задача, що полягає у визначенні довірчого інтервалу.

Довірчим інтервалом з границями (чи довірчими границями від $-\psi_\partial$ до $+\psi_\partial$, рис. 2.8, в) називають інтервал, який із заданою імовірністю P_∂, яку називають довірчою, накриває істинне значення вимірювальної величини.

Найчастіше застосовуваним на практиці обробки результатом вимірювань для нормального закону розподілу є значення довірчої ймовірності для значень довірчого інтервалу, які рівні $\frac{2}{3}\sigma$, 2σ, і 3σ. Значення довірчих ймовірностей для них відповідно рівні 0,500; 0,950; 0,997. Фізично це означає, що поява випадкових похибок за межами інтервалу $\pm\frac{2}{3}\sigma$ рівноймовірна, тобто складає 50 % ймовірності появи випадкових похибок, менших за значеннями $\frac{2}{3}\sigma$, і 50 % –

більших $\frac{2}{3}\sigma$. При інтервалах, рівних ±2σ і ±3σ, ймовірність появи випадкових похибок, більших 2σ і 3σ, складає відповідно 5 і 0,3 %.

Найчастіше зустрічається у вимірювальній практиці закон розподілу випадкової похибки, що є рівномірним законом (рис. 2.9, а), коли неперервна випадкова величина має можливі значення в межах деякого кінцевого інтервалу, причому в межах цього інтервалу всі значення випадкової величини володіють однієї і тією ж густиною ймовірності:

$$p(\psi)=\begin{cases}0 \ при \ -\infty<\Psi<-a;\\ \frac{1}{2}a \ при \ -a\le\Psi\le+a;\\ 0 \ при \ +a<\Psi<+\infty.\end{cases} \qquad (2.15)$$

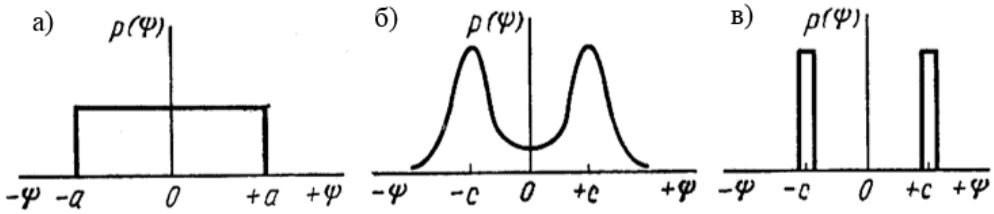


Рисунок 2.9 – Види диференціальних законів розподілу випадкової похибки

Прикладом рівномірного розподілу похибки може служити похибка від тертя в приладах з механічними рухливими елементами.

Графічна інтерпретація закону розподілу, називаного двомодальним, показана на рисунку 2.9, (б). Відповідно до цього закону малі випадкові похибки зустрічаються рідше, ніж великі. Середина кривої розподілу щільності ймовірності виявляється прогнутою вниз. У межі такий двомодальний розподіл може перетворитися в розподіл, показаний на рисунку 2.9, (в), коли похибками, що єдино спостерігаються, будуть похибки ±c. Такий розподіл називають дискретним. Двомодальний розподіл зазвичай представляють як композицію дискретного і нормального розподілів із середньоквадратичним відхиленням σ_M і аналітично описується виразом:

$$p(\psi)=\frac{1}{2\sigma_M\sqrt{2\pi}}\left[e^{-\frac{(\Psi-c)^2}{2\sigma_M^2}}+e^{-\frac{(\Psi+c)^2}{2\sigma_M^2}}\right]. \qquad (2.16)$$

Поява двомодального розподілу, зазвичай, викликана явищами люфту і гістерезису в кінематичних ланцюгах засобів вимірювань.

Систематична похибка – це складова похибки вимірювання, що залишається постійною чи закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини (рис. 2.7).

Виявлення й оцінка систематичних похибок є найбільш важким моментом

будь-якого вимірювання і часто пов’язані з необхідністю проведення досліджень. Виявлена й оцінена систематична похибка виключається з результату введенням поправки. Залежно від причини виникнення розрізняють такі систематичні похибки.

Похибка методу (теоретична похибка) вимірювань – це складова похибки вимірювання, яка обумовлена недосконалістю методу вимірювання. Тут необхідно враховувати той факт, що метод вимірювання, за визначенням, включає в себе і принцип вимірювання. Розглянута похибка визначається в основному недосконалістю принципу вимірювання і, зокрема, недостатньою вивченістю явища, покладеного в основу вимірювання.

Інструментальна похибка вимірювання – це складова похибка вимірювання, що залежить від похибки застосовуваних засобів вимірювань. Дана похибка має декілька складових, найбільш важливі з яких визначаються недосконалістю конструкції (чи схеми), технології виготовлення засобів вимірювань, поступовим їх спрацьовуванням і старінням матеріалів, із яких ці засоби вимірювань виготовлені.

Похибка встановлення є наслідком неправильності установки засобів вимірювань.

Похибка від впливових величин є наслідком впливу на об’єкт і засоби вимірювань зовнішніх факторів (теплових і повітряних потоків, магнітних, електричних, гравітаційних та інших полів, атмосферного тиску, вологості повітря, іонізуючого випромінювання тощо).

Суб’єктивна похибка обумовлена індивідуальними властивостями людини, що виконує вимірювання. Причиною її є укорінені неправильні навички виконання вимірювань. До цієї систематичної похибки відносяться, наприклад, похибка через неправильне відрахування десятих часток поділок шкали приладу, похибки через різну для різних людей швидкості реакції тощо.

За характером прояву систематичні похибки поділяють на постійні та змінні (рис. 2.7).

Постійні похибки не змінюють свого значення при повторних вимірюваннях. Причинами цих похибок є неправильне градуювання чи юстировка засобів вимірювань та неправильне встановлення початку відліку тощо.

Змінні похибки при повторних вимірюваннях можуть приймати різні значення. Якщо змінна похибка при повторних вимірюваннях зростає чи спадає, то її називають прогресивною. Змінна похибка може змінюватися при повторних вимірюваннях періодично чи за складним законом.

Причинами виникнення змінної систематичної похибки є: дія зовнішніх факторів і особливості конструкцій засобів вимірювань.

Похибки, які приведені на рисунку 2.7, можуть мати місце як при статичних, так і при динамічних вимірюваннях. Похибки, які виникають при цих вимірюваннях, прийнято називати відповідно статичними чи динамічними.

Статичні – це похибки, які виникають під час статистичних вимірювань, у яких вимірювана величина упродовж вимірювального експерименту не змінюється, а також у використовуваних засобах вимірювальної техніки закінчилися перехідні процеси при поданні на їх вхід вимірювальної величини.

Динамічні – це похибки, які виникають під час так званих динамічних вимірювань, в яких вимірювана величина під час вимірювального експерименту може змінюватися, або якщо у застосовуваних засобах вимірювальної техніки ще не закінчилися перехідні процеси при поданні на їх вхід вимірюваної величини.

Динамічні похибки зумовлені інерційними властивостями ЗВТ, а точніше – невідповідністю їх справжніх динамічних властивостей ідеальним. Ці похибки виникають при вимірюванні змінних в часі величин чи параметрів змінних сигналів і проявляються в тому, що при подачі на вхід ЗВТ вхідного сигналу $x(t)$ його вихідний сигнал $y(t)$ змінюється в часі інакше, ніж мав би змінюватися при ідеальних динамічних властивостях $y_н(t)$. Тобто динамічна похибка на виході ЗВТ:

$$\Delta_д(t) = y(t) - y_н(t). \qquad (2.17)$$

2.5 Статичні характеристики

Режим роботи вимірювального пристрою, при якому значення вхідного X і вихідного Y сигналів не змінюються, називають статичним (стаціонарним чи врівноваженим).

Статичною характеристикою вимірювального пристрою називають функціональну залежність вихідного сигналу від вхідного в статичному режимі роботи зазначеного пристрою. Більш точно статичну характеристику можна визначити як залежність інформативного параметра вихідного сигналу від інформативного параметра його вхідного сигналу в статичному режимі. Статична характеристика описується в загальному випадку деяким нелінійним рівнянням (рівнянням перетворення):

$$Y = f(X). \qquad (2.18)$$

Для вимірювальних перетворювачів, а також вимірювальних приладів з неіменованою шкалою чи зі шкалою, відградуйованою в одиницях, відмінних від одиниць вимірювальної величини, статичну характеристику прийнято називати функцією перетворення. Для вимірювальних приладів іноді статичну характеристику називають характеристикою шкали.

Визначення статичної характеристики пов’язано з виконанням градуювання, тому для всіх засобів вимірювань використовують поняття градуювальної характеристики, під яким розуміють залежність між значеннями величин на виході і вході засобу вимірювань, складену у вигляді таблиці, графіка чи формули.

На рисунку 2.10 показані види статичних характеристик вимірювальних пристроїв. За винятком спеціальних випадків, основна вимога, яка висувається до статичної характеристики вимірювальних пристроїв, зводиться до одержання лінійної залежності між вихідною і вхідною величинами. На практиці ця вимога реалізується в загальному випадку тільки з деякою прийнятою заздалегідь похибкою.

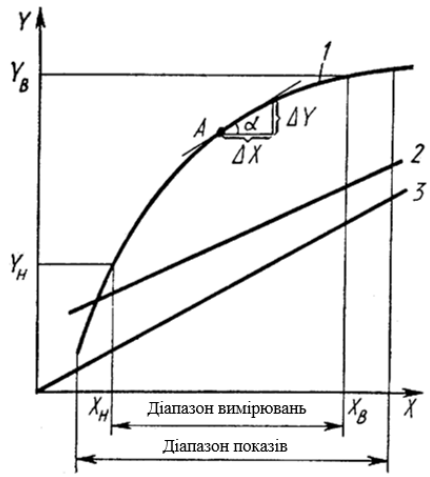


Рисунок 2.10 – Статична характеристика вимірювального пристрою

Крім статичної характеристики для визначення метрологічних властивостей вимірювальних пристроїв використовується ряд параметрів.

На рисунку 2.10 на статичній характеристиці 1 графічно представлені поняття діапазону показів, діапазону вимірювань нижньої $X_н$, $Y_н$ і верхньої $X_в$, $Y_в$ меж вимірювань.

Діапазон показів – це область значень шкали, обмежена кінцевим і початковим значеннями шкали.

Діапазон вимірювань (робоча частина шкали) – це область значень вимірюваної величини (на шкалі приладу), для якої нормовані допустимі похибки засобів вимірювань.

В окремому випадку зазначені діапазони можуть збігатися.

Стосовно вимірювальних пристроїв узагалі діапазон вимірювань часто називають робочим діапазоном перетворень. Верхня межа вимірювань – це найбільше значення діапазону вимірювань. Нижня межа вимірювань – це найменше значення діапазону вимірювань.

Зі сказаного випливає, що діапазон вимірювань визначається різницею значень верхньої і нижньої меж вимірювань ($X_в$–$X_н$; $Y_в$–$Y_н$). Для кількісної оцінки впливу на вихідний сигнал вимірювального пристрою вхідного сигналу в довільній точці (рис. 2.10) статичної характеристики служить межа відношення приросту ΔY вихідного сигналу до приросту ΔX вхідного сигналу, коли останнє прямує до нуля, тобто похідна у вибраній точці:

$$S = \lim_{\Delta X \to 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX}. \qquad (2.19)$$

Стосовно вимірювальних приладів цей параметр називають чутливістю і визначають як відношення зміни сигналу на виході вимірювального приладу до вимірювальної величини, що викликає його зміну. Графічно вона визначається тангенсом кута нахилу α дотичної (рис. 2.10), проведеної до вибраної точки А статичної характеристики.

Якщо статична характеристика вимірювального приладу нелінійна (крива 1

на рисунку 2.10), то його чутливість буде різною у різних точках характеристики, а шкала приладу – нерівномірною. Прилади з лінійною (пряма 2 на рис. 2.10) чи пропорційною (пряма 3 на рисунку 2.10) статичної характеристики мають незмінну у будь-якій точці шкали чутливість і рівномірну шкалу.

У вимірювальних перетворювачів статична характеристика, як правило, є лінійною:

$$Y = KX\,. \tag{2.20}$$

Тут K – коефіцієнт перетворення (чи при використанні перетворювача в системах автоматичного регулювання – коефіцієнт передачі), який визначений як відношення сигналу на виході вимірювального перетворювача, що відбиває вимірювану величину, до викликаного цього сигналу на вході перетворювача.

Для вимірювальних приладів важливим параметром є ціна поділки, яка визначається як різниця значень величин, що відповідають двом сусіднім відміткам шкали. Фізично ціна поділки визначається кількістю одиниць вхідної величини, що містяться в одній поділці шкали вимірювального приладу.

Ціна поділки однозначно пов’язана з числом поділок n шкали вимірювального приладу. Останнє у свою чергу зв’язано з похибкою вимірювального приладу, що зазвичай представляється його класом точності Λ. Число поділок шкали вимірювального приладу, як правило, у першому наближенні визначається зі співвідношення:

$$n \geq 10/(2\Lambda). \tag{2.21}$$

При виконанні умови (2.21) число поділок шкали вибирають таким, щоб ціна поділки складала ціле число одиниць вимірювальної величини.

Порогом чутливості (порогом реагування) вимірювального пристрою розуміють ту найменшу зміну вхідного сигналу, що викликає упевнено фіксовану зміну вихідного сигналу.

Як правило, спостерігач, який здійснює вимірювання, упевнено може помітити зсув стрілки на половину поділки шкали, тому поріг чутливості можна вважати рівним половині ціни поділки, а якщо врахувати при цьому співвідношення (2.21), то у першому наближенні поріг чутливості дорівнює класу точності Λ.

Однією із найважливіших умов одержання коректних результатів вимірювань є врахування взаємодії вимірювальних пристроїв між собою і з об’єктом вимірювань.

При підключенні вимірювального пристрою чи перетворювача до об’єкта вимірювань останній споживає деяку енергію чи потужність від об’єкта. Аналогічна ситуація має місце при підключенні вимірювального приладу чи перетворювача до виходу попереднього за ланцюгом вимірювання перетворювача. Це визначає необхідність враховувати властивості вимірювальних пристроїв відбирати чи віддавати енергію через свої вхідні чи вихідні ланцюги.

Як характеристику зазначеної властивості прийнято використовувати для вимірювальних пристроїв поняття вхідного імпедансу (повного чи удаваного опору), а для вимірювальних перетворювачів – поняття вхідного і вихідного імпедансів. У загальному випадку під імпедансом Z розуміють відношення узагальненої сили N до обумовленої нею узагальненої швидкості W:

$$Z = N/W\,. \tag{2.22}$$

Сьогодні поняття вхідного і вихідного імпедансів широко використовується для електричних вимірювальних пристроїв. При цьому імпеданс визначається як відношення напруги до струму. Стосовно вимірювальних пристроїв для неелектричних величин у кожному окремому випадку потрібно проведення досліджень для встановлення найбільш доцільної форми представлення вхідного і вихідного імпедансів.

2.6 Динамічні характеристики

Режим роботи вимірювального пристрою, при якому значення вихідного і вхідного сигналів змінюються за часом, називають динамічним (нестаціонарним чи неврівноваженим).

Практично усі вимірювальні пристрої мають у своєму складі інерційні елементи, а саме: рухливі механічні вузли, електричні чи пневматичні ємності, індуктивності, елементи, що володіють тепловою інерцією тощо. Наявність інерційних елементів визначає інерційність усього вимірювального пристрою, тобто приводить до того, що у динамічному режимі миттєве значення вихідного сигналу вимірювального пристрою залежить не тільки від миттєвого значення вхідного сигналу, але і від будь-яких змін цього сигналу, тобто від його першої і другої похідних і похідних більш високого порядку.

Зазначені інерційні властивості вимірювальних пристроїв визначають динамічною характеристикою.

Динамічна характеристика вимірювального пристрою – це залежність між інформативними параметрами вихідного і вхідного сигналів та часом чи залежність вихідного сигналу від вхідного у динамічному режимі.

Динамічну характеристику вимірювального пристрою прийнято описувати диференціальним рівнянням, передатною чи комплексною частотною функціями.

У переважній більшості випадків динамічна характеристика вимірювальних пристроїв у лінійній частині статичної характеристики (для вимірювальних пристроїв з лінійною статичною характеристикою у всьому діапазоні перетворень) може бути описана диференціальним рівнянням виду:

$$a_n \frac{d^n Y(\tau)}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \ldots + a_1 \frac{dY(\tau)}{d\tau} + Y(\tau) = KX(\tau), \tag{2.23}$$

чи відповідною передатною функцією:

$$W(p)=\frac{K}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + a_1 p + 1}, \tag{2.24}$$

або

$$Y(p)=W(p)X(p), \tag{2.25}$$

де $Y(\tau)$ і $X(\tau)$ – вихідний і вхідний сигнали вимірювального пристрою як функції часу;

n – число, що визначає порядок похідної.

Передатну функцію $W(p)$ можна розглядати як коефіцієнт перетворення вимірювального пристрою в динамічному режимі.

Передатна функція, як і диференціальне рівняння, є вичерпною характеристикою інерційних властивостей вимірювального пристрою. Вона дозволяє визначати реакцію вимірювального пристрою на вхідні сигнали, що змінюються в часі за будь-яким законом.

Передатну функцію вимірювальних пристроїв зручно використовувати при аналізі роботи останніх в автоматичних системах регулювання. Її визначають зазвичай через перехідну чи тимчасову характеристику, яка визначається як зміна у часі вихідного сигналу $h(\tau)$ вимірювального пристрою при подачі на його вхід стрибкоподібного сигналу, рівного за значенням одиниці вхідної величини.

Якщо висота стрибкоподібного вхідного сигналу не дорівнює одиниці, а має деяке значення X_A, то за перехідною характеристикою можна визначити вихідний сигнал, використовуючи вираз:

$$Y(\tau)=h(\tau)X_A. \tag{2.26}$$

Для визначення інерційних властивостей вимірювальних пристроїв за перехідними характеристиками зазвичай використовують запозичене з теорії автоматичного регулювання поняття динамічної ланки. Перехідні характеристики і передатні функції типових динамічних ланок відомі, що дозволяє за формою перехідної характеристики вимірювального пристрою ототожнити його з якою-небудь типовою динамічною ланкою, а отже, визначити форму передатної функції випробовуваного вимірювального пристрою. Описану процедуру прийнято називати ідентифікацією.

На рисунку 2.11 показані найбільш типові для вимірювальних пристроїв форми перехідних характеристик, тобто криві перехідних процесів, чи криві розгону.

Для їхнього одержання у нульовий (для простоти) момент часу вхідний сигнал вимірювального пристрою стрибком змінюється на X_A, від деякого значення X_1 до X_2 (рис. 2.11, а). Після закінчення перехідного процесу вихідний сигнал вимірювального пристрою змінюється на Y_A від значення Y_1 до Y_2.

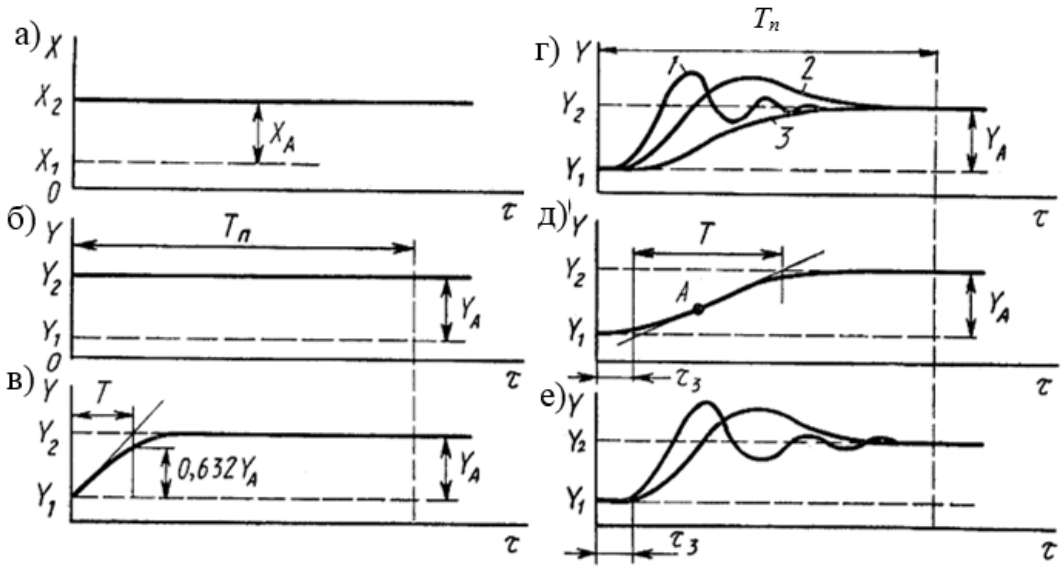


Рисунок 2.11 – Типові для вимірювальних пристроїв форми перехідних процесів

Для визначення коефіцієнта перетворення *K* вимірювального пристрою досить обчислити відношення Y_A / X_A.

Перехідні процеси, які показані на рисунку 2.11, (б, в, г), відповідають типовим підсилювальній (безінерційній), аперіодичній першого порядку і коливній ланкам.

Процес, який представлений на рис. 2.11, (б), характерний для електронних вимірювальних пристроїв, а процеси, представлені на рис. 2.11, в, г, – для великого числа вимірювальних пристроїв, заснованих на прямому перетворенні. Крива на рис. 2.11, (в) є експонентою, а величина *T* (дотична) називається постійною часу.

Вона визначає собою час, за який вихідний сигнал досяг би нового установленого значення, якби змінювався з постійною швидкістю, рівною швидкості в момент стрибкоподібної зміни вхідного сигналу.

Постійна часу використовується для характеристики динамічних властивостей вимірювальних пристроїв. Проведення дотичної і кривої перехідного процесу пов’язано з похибками, тому значення постійної часу визначають як інтервал часу, за який вихідний сигнал змінюється на 0,632 від свого збільшення Y_A (рис. 2.11, в). Коректність такого визначення легко доводиться математично.

Коливальна динамічна ланка, а отже, і вимірювальний пристрій, у якому має місце перехідний процес (рис. 2.11, г), можна розглядати як з’єднання двох аперіодичних ланок з постійними часу T_1 і T_2. При цьому залежно від співвідношень T_1 і T_2 перехідний процес буде різний. Якщо $T_1/T_2 < 2$, то він має форму кривих 1 і 2, а при $T_1/T_2 \geq 2$ – форму кривої 3 (рис. 2.11, г).

Перехідні процеси, які показані на рисунку 2.11, (д), (е), характерні для випадків, коли диференціальне рівняння, що описує динаміку вимірювального пристрою, має порядок більший, ніж другий. У цих випадках прийнято розглядати вимірювальні пристрої як сукупність декількох, з’єднаних послідовно

типових динамічних ланок. Наприклад, вимірювальний пристрій з перехідним процесом, показаний на рисунку 2.11, (д), можна розглядати як з'єднання ланки чистого запізнювання з часом запізнювання $\tau_з$ і аперіодичної ланки з постійною часу T (для графічного визначення значень $\tau_з$ і T досить провести дотичну до точки перегину А на рисунку 2.11, (д)). Вимірювальний пристрій з перехідним процесом, показаним на рисунку 2.11, (е), можна розглядати як з'єднання ланки чистого запізнювання і коливної ланки.

Для усіх вимірювальних пристроїв важливим є час встановлення вихідного сигналу (чи показів) T_n (рис. 2.11), який також називають часом реакції. Він визначає собою відрізок часу, який необхідний для завершення перехідного процесу при стрибкоподібній зміні вхідного сигналу.

Оскільки в основному всі розглянуті перехідні процеси (рис. 2.11) теоретично закінчуються тільки при нескінченному значенні часу, то за час реакції T_n зазвичай приймають час, за який вихідний сигнал вимірювального пристрою, наближаючись до нового встановленого значення, входить у деяку зону, що відрізняється від цього значення на ±5 % від зміни вихідного сигналу, що відповідає даному стрибкоподібному вхідному сигналу.

Значення часу реакції може бути приблизно визначено через постійну часу вимірювального пристрою із співвідношення:

$$T_n=(3\div5)T. \qquad (2.27)$$

Диференціальні рівняння і передатні функції розглянутих найбільш типових за інерційними властивостями вимірювальних пристроїв наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Типові диференціальні рівняння і передатні функції вимірювальних пристроїв

Крива перехідного процесу	Диференціальне рівняння	Передатна функція
Рисунок 2.11, б	$Y(\tau)=K(\tau)$	K
Рисунок 2.11, в	$T\frac{dY(\tau)}{d\tau}+Y(\tau)=KX(\tau)$	$\frac{K}{Tp+1}$
Рисунок 2.11, г	$T_2^2\frac{d^2Y(\tau)}{d\tau^2}+T_1\frac{dY(\tau)}{d\tau}+Y(\tau)=$ $=KX(\tau)$	$\frac{K}{T_2^2p^2+T_1p+1}$
Рисунок 2.11, д	$T=\frac{dY(\tau)}{d\tau}+Y(\tau)=KX(\tau-\tau_3)$	$\frac{K}{Tp+1}e^{-\tau_3 p}$
Рисунок 2.11, е	$T_2^2\frac{d^2Y(\tau)}{d\tau^2}+T_1\frac{dY(\tau)}{d\tau}+Y(\tau)=$ $=KX(\tau-\tau_3)$	$\frac{K}{T_2^2p^2+T_1p+1}e^{-\tau_3 p}$

2.7 Похибки вимірювальних пристроїв

Інструментальна похибка (чи похибка вимірювальних пристроїв) має визначальне значення для найбільш розповсюджених технічних вимірювань.

На рисунку 2.12 приведена класифікація похибок вимірювальних пристроїв за рядом ознак.

За характером прояву при повторних вимірюваннях одного і того ж значення фізичної величини прийнято виділяти систематичну і випадкову похибки (чи складові похибки) вимірювальних пристроїв. У ці поняття в основному вкладається той же зміст, що й у поняття систематичної і випадкової похибок вимірювань. Особливість тут полягає в тому, що будь-який вимірювальний пристрій призначається для внесення визначеності у досліджуваний процес, а наявність випадкової складової похибки призводить до неоднозначності. У зв'язку з цим, перша задача, що зазвичай розв'язується при створенні вимірювальних пристроїв, полягає в тому, щоб випадкову похибку зробити незначною. Якщо ця умова виконується, а елементи, що входять до складу вимірювального пристрою, стабільні, то можна шляхом градуювання забезпечити досить малі систематичні похибки вимірювального пристрою. Розглянута концепція використовується як основна при створенні робочих засобів вимірювань і, зокрема, вимірювальних пристроїв для технологічних вимірювань.

Залежно від умов застосування вимірювальних пристроїв розрізняють основну і додаткову похибки.

Основною похибкою засобу вимірювань називають похибку при використанні його у нормальних умовах.

Нормальними умовами застосування засобів вимірювань називають умови, за яких впливові величини мають номінальні значення чи перебувають у межах нормальної області значень. Нормальні умови застосування вказуються в стандартах чи технічних умовах на засоби вимірювань. При використанні засобів вимірювань у нормальних умовах вважають, що впливові на них величини практично ніяк не змінюють їхньої характеристики.

Додатковою похибкою вимірювального перетворювача (чи зміною показів вимірювального приладу) називають зміну його похибки, викликаної відхиленням однієї із впливових величин від її нормативного значення чи виходом її за межі нормальної області значень. Додаткова похибка може бути викликана зміною відразу декількох впливових величин.

Зміна похибки, як й інших характеристик і параметрів вимірювальних пристроїв під дією впливових величин, описується функціями впливу.

Іншими словами, додаткова похибка – це частина похибки, що додається (мається на увазі алгебраїчне додавання) до основної у випадках, коли вимірювальний пристрій застосовується у робочих умовах. Робочі умови зазвичай такі, що зміни значень від дії впливових величин для них істотно більші, ніж для нормальних умов, тобто область робочих (частина цієї області називається розширеною областю) умов включає у себе область нормальних умов.



Рисунок 2.12 – Класифікація похибок вимірювальних пристроїв

У деяких випадках основна похибка вимірювальних пристроїв визначається для робочої області зміни значень впливових величин. У цих випадках поняття додаткової похибки втрачає зміст.

Залежно від режиму застосування розрізняють статичну і динамічну похибки вимірювальних пристроїв.

За формою представлення прийнято розрізняти абсолютну, відносну і приведену похибки вимірювальних пристроїв (рис. 2.12). Для вимірювальних приладів і перетворювачів визначення цих похибок специфічне. У вимірювальних приладів є шкала, яка відградуйована в одиницях вхідної величини, або шкала, відградуйована в умовних одиницях з відомим |множником шкали, тому результат вимірювання представляється в одиницях вхідної величини. Це обумовлює простоту визначення похибки вимірювальних приладів.

Абсолютною похибкою вимірювального приладу Δ називають різницю показів приладу $X_п$ та істинного (дійсного) $X_д$, значення вимірювальної величини:

$$\Delta = X_п - X_д. \tag{2.12}$$

Дійсне значення визначається за допомогою зразкового приладу чи відтворюється мірою.

Відносною похибкою вимірювального приладу називають відношення абсолютної похибки вимірювального приладу до дійсного значення вимірювальної величини. Відносну похибку виражають у відсотках:

$$\delta = \Delta \cdot 100 / X_д. \tag{2.13}$$

Оскільки $\Delta << X_д$ чи $X_п$, то у виразі (2.13) замість значення $X_д$ може бути використано значення $X_п$.

Приведеною похибкою вимірювального приладу називають відношення абсолютної похибки вимірювального приладу до нормованого значення X_N. Приведену похибку також виражають у відсотках:

$$\gamma = \Delta \cdot 100 / X_N. \tag{2.14}$$

Як нормоване значення використовується верхня межа вимірювань, діапазон вимірювань тощо, тобто

$$\gamma = \Delta \cdot 100 / (X_в - X_н). \tag{2.15}$$

У вимірювальних перетворювачів результати вимірювань представляються в одиницях вихідної величини. У зв'язку з цим для вимірювальних перетворювачів прийнято розрізняти похибки за входом і виходом. При визначенні цих похибок необхідно знати приписану даному вимірювальному перетворювачу функцію перетворення (градуювальну характеристику) $Y = f(X)$.

Абсолютною похибкою вимірювального перетворювача за виходом Δ_y називають різницю між значенням величини Y_n на виході перетворювача, що відображає вимірювану величину, і значенням $Y_д$ величини на виході, які визначаються за дійсним значенням величини на вході за допомогою градуювальної характеристики, приписаної перетворювачу:

$$\Delta_y = Y_n - Y_д, \tag{2.16}$$

де Y_n – значення вихідного сигналу перетворювача при визначеному значенні вхідного сигналу;

$Y_д$ – значення вихідного сигналу, що повинен вироблятися перетворювачем, позбавленим похибки, при тому же значенні вхідного сигналу.

Значення Y_n визначають за допомогою зразкового засобу вимірювань, а значення $Y_д$ розраховують за допомогою функції перетворення за дійсним значенням вхідної величини $X_д$, що відтворюється мірою чи визначається за допомогою відповідного зразкового засобу вимірювань:

$$Y_д = f\left(X_д\right). \tag{2.17}$$

Із (2.16) і (2.17) знаходимо*:*

$$\Delta_y = Y_n - f\left(X_д\right). \tag{2.18}$$

Абсолютною похибкою вимірювального перетворювача за входом Δ_x називають різницю між значенням X_n величини на вході перетворювача, визначену за дійсним значенням $Y_д$ величини на його виході за допомогою градуювальної характеристики, приписаної перетворювачу, і дійсним значенням $X_д$ величини на вході перетворювача:

$$\Delta_x = X_n - X_д. \tag{2.19}$$

Значення $X_д$ визначається за допомогою відповідного зразкового засобу вимірювань чи відтворюється мірою, а значення X_n визначається за значенням Y_n вихідного сигналу за допомогою функції перетворення, розв’язаної відносно X, тобто $X_n = \varphi\left(Y_n\right)$ (φ – символ зворотний до функції перетворення). Таким чином,

$$\Delta_x = \varphi\left(Y_n\right) - X_д. \tag{2.20}$$

Відносною похибкою вимірювального перетворювача за входом (виходом) називають відношення абсолютної похибки вимірювального перетворювача за входом (виходом) до дійсного значення величини на вході (до значення величини на виході, визначеному за дійсним значенням величини на вході за градуювальною характеристикою, приписаною перетворювачу):

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{X_д}100 = \frac{\varphi(Y_П) - X_д}{X_д}100, \quad (2.21)$$

$$\delta_y = \frac{\Delta_y}{Y_д}100 = \frac{Y_П - f(X_д)}{f(X_д)}100, \quad (2.22)$$

де δ_x і δ_y – відносні похибки за входом і виходом відповідно.

Приведеною похибкою вимірювального перетворювача за входом (виходом) називають відношення абсолютної похибки до нормованого значення вхідного X_N (вихідного Y_N) сигналу:

$$\gamma_x = \frac{\Delta_x}{X_N}100 = \frac{\varphi(Y_П) - X_д}{X_N}100, \quad (2.23)$$

$$\gamma_y = \frac{\Delta_y}{Y_N}100 = \frac{Y_П - f(X_д)}{Y_N}100, \quad (2.24)$$

де γ_x і γ_y – приведені похибки вимірювального перетворювача за входом і виходом відповідно.

Зазвичай, як нормоване значення використовується діапазон вимірювань вхідного сигналу перетворювача $X_в$–$X_н$ чи відповідний йому діапазон вимірювань вихідного сигналу $Y_в$–$Y_н$. Тоді

$$\gamma_x = \frac{\varphi(Y_П) - X_д}{X_в - X_н}100, \quad (2.25)$$

$$\gamma_y = \frac{Y_П - f(X_д)}{Y_в - Y_н}100. \quad (2.26)$$

Для вимірювальних перетворювачів з лінійною функцією перетворення виду $Y - Y_н = K(X - X_н)$ приведені похибки за входом і виходом відповідно до (2.25) і (2.26) визначаються виразами:

$$\gamma_x = \frac{(Y_П - Y_н)/K + X_н - X_д}{X_в - X_н}100, \quad (2.27)$$

$$\gamma_y = \frac{Y_П - K(X_д - X_н) - Y_н}{Y_в - Y_н}100, \quad (2.28)$$

де K – коефіцієнт перетворення вимірювального перетворювача, який визначений відношенням $(Y_в - Y)/(X_в - X_н)$.

Надзвичайно важливим для застосування вимірювальних пристроїв і правильної оцінки похибки вимірювань, одержуваної при їхньому використанні, є відомості про залежність похибки від значення вимірювальної величини в межах діапазону вимірювань, а також відомості про зміни цієї похибки під дією впливових величин.

Залежність похибки від значення вимірювальної величини визначається прийнятою конструкцією (схемою) і технологією виготовлення вимірювального пристрою. Вплив названих факторів на цю залежність різний. Залежність похибки від значення вимірювальної величини властива усім вимірювальним пристроям даного типорозміру, побудованим за прийнятою конструкцією. Вплив технології виготовлення на розглянуту залежність індивідуальний для кожного екземпляру, тобто, значення похибок за одних і тих же самих значень вимірюваного параметра різні для різних екземплярів вимірювального пристрою даного типорозміру.

Для розгляду залежності похибки вимірювальних пристроїв від значення вимірюваної величини зручно використовувати поняття номінальної і реальної функцій перетворення вимірювального пристрою.

Номінальною (чи ідеальною) функцією перетворення називають функцію перетворення, яка приписана вимірювальному пристрою даного типу, вказана в його паспорті та використовується під час виконання з його допомогою вимірювань.

Реальною функцією перетворення називають ту функцію перетворення, якою володіє конкретний екземпляр вимірювального пристрою даного типу.

Через недосконаліть конструкції і технології виготовлення реальна функція перетворення вимірювального пристрою відрізняється від номінальної. Ця відмінність і визначає похибку даного вимірювального пристрою. Відхилення реальної характеристики від номінальної різні і залежать від значення вимірювальної величини. За цією ознакою похибки прийнято розділяти (рис. 2.12) на адитивну, мультиплікативну, лінійності і гістерезису.

Графічно утворення перерахованих похибок показано на рисунку 2.13.

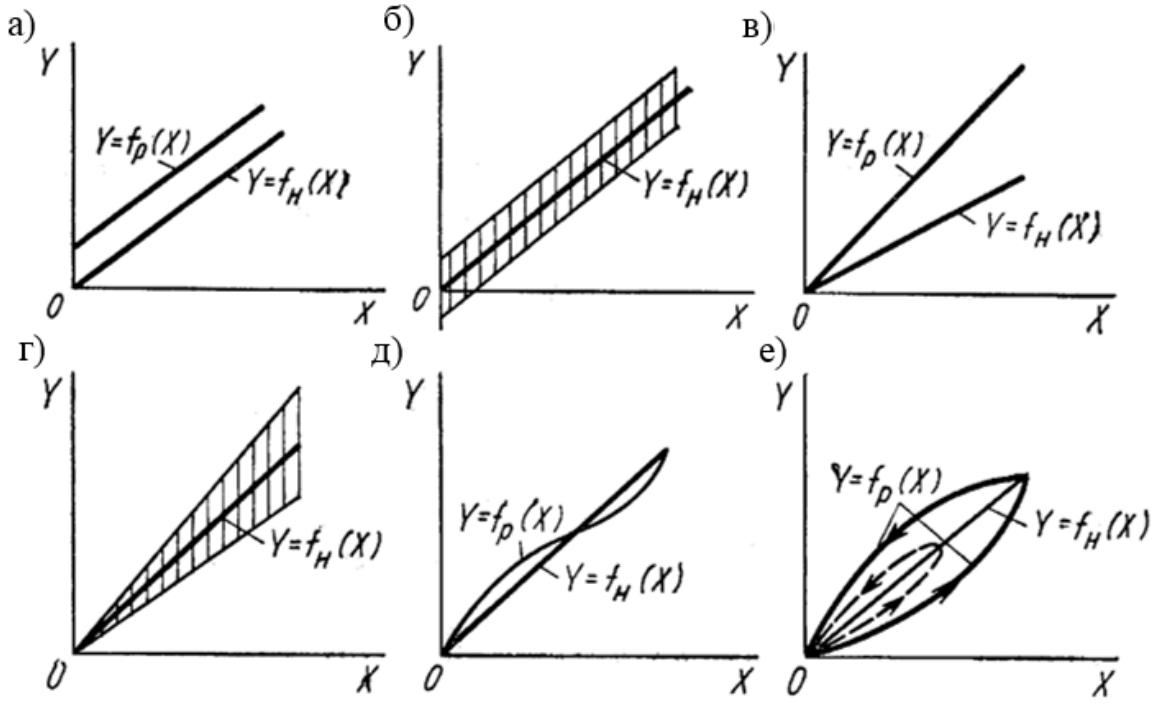


Рисунок 2.13 – Реальні функції перетворення вимірювальних пристроїв

Адитивною (одержувану шляхом додавання), чи похибкою нуля вимірювальних пристроїв, називають похибку, що залишається постійною при всіх значеннях вимірювальної величини.

На рисунку 2.13, (а) показано, що реальна функція перетворення $Y = f_p(X)$ трохи зміщена відносно номінальної $Y = f_н(X)$, тобто, вихідний сигнал вимірювального пристрою за всіх значень вимірювальної величини X буде більшим (чи меншим) на одну і ту саму величину, ніж він повинен бути, відповідно до номінальної функції перетворення.

Якщо адитивна похибка є систематичною, то вона може бути усунута. Для цього у вимірювальних пристроях, зазвичай, присутній спеціальний настроювальний вузол (коректор) нульового значення вихідного сигналу.

Якщо адитивна похибка є випадковою, то її не можна виключити, а реальна функція перетворення зміщується за відношенням до номінальної в часі довільним чином. При цьому для реальної функції перетворення можна визначити деяку смугу (рис. 2.13, б), ширина якої залишається постійною при всіх значеннях вимірюваної величини.

Виникнення випадкової адитивної похибки зазвичай викликано тертям в опорах, контактними опорами, дрейфом нуля, шумом і фоном вимірювального пристрою.

Мультиплікативною (одержуваною шляхом множення), чи похибкою чутливості вимірювальних пристроїв, називають похибку, яка лінійно зростає (чи спадає) зі збільшенням вимірюваної величини.

Графічно поява мультиплікативної похибки інтерпретується поворотом реальної функції перетворення щодо номінальної (рис. 2.13, в). Якщо мультиплікативна похибка є випадковою, то реальна функція перетворення представляється смугою, показаною на рисунку 2.13, (г). Причиною виникнення мультиплікативної похибки зазвичай є зміна коефіцієнтів перетворення окремих елементів і вузлів вимірювальних пристроїв.

На рисунку 2.13, (д) показано взаємне розташування номінальної і реальної функцій перетворення вимірювального пристрою у випадку, коли відмінність цих функцій викликана нелінійними ефектами. Якщо номінальна функція перетворення лінійна, то викликану таким розташуванням реальної функції перетворення систематичну похибку називають похибкою лінійності. Причинами даної похибки можуть бути конструкція (схема) вимірювального пристрою і нелінійні спотворення функції перетворення, що пов’язані з недосконалістю технології виробництва.

Найбільш суттєвою і систематичною похибкою вимірювальних пристроїв, що важко усувається, є похибка гістерезису (від грецьк. hysteresis – запізнювання), чи похибка зворотного ходу, що виражається в розбіжності реальної функції перетворення вимірювального пристрою при збільшенні (прямий хід) і зменшенні (зворотний хід) вимірюваної величини (рис. 2.13, е). Причинами гістерезису є: люфт і сухе тертя в механічних передавальних елементах, гістерезисний ефект у феромагнітних матеріалах, внутрішнє тертя в матеріалах пружин, явище пружної післядії в пружних чутливих елементах,

явище поляризації в електричних, п'єзоелектричних і електрохімічних елементах тощо. Істотним при цьому є той факт, що форма одержуваної петлі реальної функції перетворення залежить від передісторії, а саме від значення вимірюваної величини, при якому після поступового збільшення останньої починається її зменшення (на рисунку 2.13, (е) це показано пунктирними лініями).

Для кількісної оцінки похибки гістерезису звернемося до рисунку 2.14.

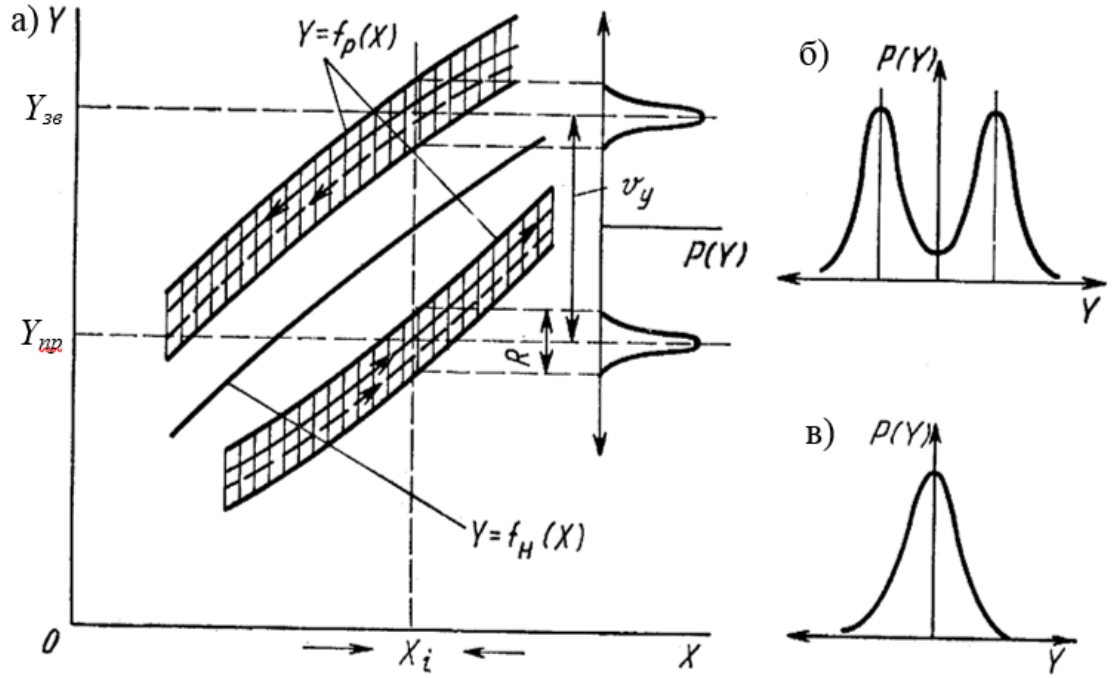


Рисунок 2.14 – Взаємне розміщення реальної і номінальної функцій перетворення вимірювального пристрою, який володіє похибкою гістерезису

Тут показаний фрагмент взаємного розташування реальної і номінальної функцій перетворення вимірювального пристрою, що володіє похибкою гістерезису. Під дією впливових величин реальна функція перетворення змінює своє розташування і форму. На рисунку 2.14, (а) для прикладу показані два її розташування, нанесені суцільною і пунктирною лініями. За нормальних умов експлуатації вимірювального пристрою всі зміни форми реальної функції перетворення не виходять за межі заштрихованих на рисунку 2.14, (а) смуг як для верхньої, так і для нижньої її віток. Якщо впливові величини, що викликають зміни положення і форми функції перетворення, під час вимірювання не виявляються, то розглянуте явище визначається невідтворюваністю і характеризує випадкову похибку вимірювального пристрою. При цьому використовують поняття «розмах» і «варіація».

Розмахом (непостійністю) R вихідного сигналу вимірювального перетворювача (показів вимірювального приладу) називають різницю між найбільшим і найменшим значеннями вихідного сигналу, що відповідають одному і ж тому самому значенню вимірюваної величини й отриманими при багаторазовому і односторонньому підході до цього значення, тобто, при поступовому збільшенні чи зменшенні вимірюваної величини (тільки при

прямому чи тільки при зворотному ході).

Розмах характеризує ширину заштрихованих на рисунку 2.14, (а) смуг, що визначають випадкову похибку при значенні вимірювального параметра, рівному X_i.

Варіацією v_y вихідного сигналу вимірювального перетворювача (показів вимірювального приладу) називають середню різницю між значеннями вихідного сигналу, що відповідають одному і тому ж значенню вимірювальної величини, отриманими при багаторазовому і двосторонньому підході до цього значення, тобто, при поступовому збільшенні і наступному зменшенні вимірювальної величини (інакше кажучи, при прямому і зворотному ході).

Як видно із рисунка 2.14, (а), при одному і тому ж значенні вимірюваної величини X_i закон розподілу вихідного сигналу вимірювального пристрою при наявності варіації є двомодальним. Якщо розмахи для нижньої і верхньої віток функції перетворення перекриваються, то закон розподілу вихідного сигналу має вигляд, показаний на рисунку 2.14, (б). Форми функцій перетворення з законами розподілу (рис. 2.14, а, б) є найбільш типовими для робочих вимірювальних пристроїв, у тому числі для пристроїв, які використовуються при технологічних вимірюваннях.

В окремому випадку у разі відсутності варіації закон розподілу вихідного сигналу є одномодальним чи нормальним (рис. 2.14, в).

Абсолютне значення варіації визначається для вимірювальних приладів v_x і перетворювачів v_y відповідно із виразів:

$$v_x = X_{пр} - X_{зв}, \tag{2.29}$$

$$v_y = Y_{пр} - Y_{зв}, \tag{2.30}$$

де $X_{пр}$ і $X_{зв}$ – покази вимірювального приладу при прямому і зворотному ходах;

$Y_{пр}$ і $Y_{зв}$ – вихідний сигнал вимірювального перетворювача при прямому і зворотному ходах.

Приведене значення варіації, зазвичай, визначається для вимірювальних приладів W_x і перетворювачів W_y відповідно із виразів:

$$W_x = \frac{v_x}{X_в - X_н}100 = \frac{X_{пр} - X_{зв}}{X_B - X_н}100, \tag{2.31}$$

$$W_y = \frac{v_y}{Y_в - Y_н}100 = \frac{Y_{пр} - Y_{зв}}{Y_B - Y_н}100, \tag{2.32}$$

тобто, визначається як відношення абсолютного значення варіації до діапазону вимірювання за входом чи за виходом вимірювального пристрою.

Використання приведених представлень про номінальну і реальну функції перетворення дозволяє наочно відобразити зміни похибок вимірювальних пристроїв під дією впливових величин (рис. 2.15).

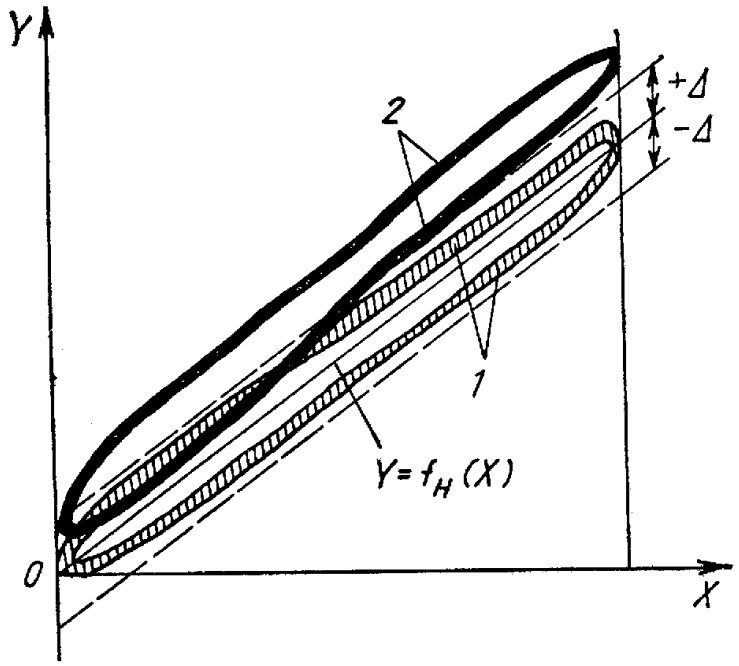


Рисунок 2.15 – Зміщення реальної функції перетворення при експлуатації вимірювального пристрою в робочих умовах

Припустимо, що при експлуатації деякого вимірювального пристрою в нормальних умовах його реальна функція перетворення має вигляд петлеподібної кривої 1, де заштрихована смуга визначає випадкову похибку, викликану зміною впливових величин у допустимих нормальними умовами межах. При цьому, зазвичай, для вимірювального пристрою встановлюється значення основної похибки. На рисунку 2.15 це показано графічно у вигляді смуги шириною ±Δ. Якщо вимірювальний пристрій експлуатується в робочих умовах, коли значення однієї чи декількох впливових величин виходить за межі, що відповідають значенням при нормальних умовах, функція перетворення виходить за встановлене для даного вимірювального пристрою значення смуги основної похибки (петлеподібна крива 2 на рисунку 2.15), тобто, з’являється додаткова похибка.

Контрольні питання

1. Навести основні класифікаційні ознаки вимірювань.
2. Навести класифікацію видів вимірювання.
3. Що таке пряме вимірювання?
4. Що таке опосередковане вимірювання?
5. Що таке сумісне вимірювання?
6. Що таке сукупне вимірювання?
7. Що таке разові вимірювання?
9. Що таке багаторазові вимірювання?
10. Що таке статистичні вимірювання?
11. Що таке контактні вимірювання?
12. Що таке безконтактні вимірювання?

13. Що таке статичні вимірювання?
14. Що таке динамічні вимірювання?
15. Що таке технічні вимірювання?
16. Що таке лабораторні (науково-дослідні) вимірювання?
17. Що таке метрологічні (еталонні) вимірювання?
18. Дати означення принципу вимірювань.
19. Дати означення методу вимірювань.
20. Навести класифікацію методів вимірювань.
21. Дати означення методу безпосереднього оцінювання.
22. Дати означення методу порівняння з мірою.
23. Що таке комбіновані методи вимірювань?
24. Що таке різницевий (диференційний) метод вимірювань?
25. Що таке компенсаційний метод вимірювань?
26. Що таке нульовий метод вимірювань?
27. Що таке метод безпосереднього порівняння з мірою?
28. Що таке метод опосередкованого порівняння з мірою?
29. Що таке метод збігу (ноніуса)?
30. Що таке метод заміщення?
31. Що таке методика вимірювання?
32. Які є види похибок вимірювання?
33. Які похибки відносяться до випадкових?
34. Які похибки відносяться до систематичних?
35. Що являє собою закон нормального розподілу випадкових величин та їх випадкових похибок?
36. Що являє собою статична характеристика вимірювальних пристроїв?
37. Що являє собою динамічна характеристика вимірювальних пристроїв?
38. Які є види похибок вимірювальних пристроїв?

ТЕМА 3
ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

План

3.1 Основні етапи обробки результатів вимірювань.
3.2 Обробка результатів прямих вимірювань.
3.3 Сумісне підсумовування систематичних та випадкових похибок.
3.4 Обробка результатів опосередкованих вимірювань.
3.5 Обробка результатів сумісних вимірювань. Вимірювання параметрів залежностей між фізичними величинами.
3.6 Обробка результатів сукупних вимірювань.

3.1 Основні етапи обробки результатів вимірювань

Після проведених вимірювальних експериментів здійснюють обробку результатів первинних вимірювань для знаходження остаточного результату вимірювання – остаточної мети вимірювання. Під час обробки результатів розв'язують дві задачі:

1. Знаходять найкращу з вибраних методики і вимірювальних засобів, умов вимірювань та отриманих експериментальних даних оцінку значення вимірюваної величини.

2. Оцінюють характеристики точності вимірювання.

Результат вимірювання є повноцінним за умови, що він супроводжується оцінкою його точності. Крім того, разом з результатом вимірювання, доцільно вказати інші важливі дані, наприклад, такі, як кількість спостережень і їх статистичний розподіл, алгоритм обробки, характеристики вимірювальних засобів, умови вимірювань, способи корекції систематичних похибок, ймовірнісні показники тощо. Наявність цих даних забезпечує можливість порівняння результатів вимірювань, виконаних за однаковими чи різними методиками, різними засобами, в різних установах.

Обсяг обробки залежить від різновиду вимірювання, кількості експериментальних даних, вимог щодо точності вимірювання, апріорної інформації про систематичні та випадкові похибки вимірювання тощо. Лише під час прямих разових вимірювань отриманий результат спостереження може бути результатом вимірювання (за умови, що систематичні похибки вимірювання не коригують). В інших вимірюваннях обробка може здійснюватися за стандартизованими методиками (наприклад статистичними методами), або вимагати створення спеціальних алгоритмів. У сукупних і сумісних вимірюваннях обов'язковим є розв'язування систем рівнянь найчастіше методом найменших квадратів.

У загальному випадку обробка передбачає такі етапи:

– попередній аналіз результатів спостережень (первинних вимірювань), їх систематизація відкидання явно недостовірних результатів;

– корекція впливу систематичних ефектів (вивчення умов вимірювань,

розрахунок і внесення поправок);

– аналіз впливу випадкових ефектів, перевірка гіпотез про їх розподіл, вибір найкращих оцінок шуканих величин;

– оцінювання характеристик точності числового алгоритму, його стійкості;

– виконання розрахунків згідно з вибраним алгоритмом;

– аналіз отриманих результатів;

– подання результатів вимірювань та характеристик їх точності за відповідною формою.

Кожен вид вимірювань має свої особливості і тому конкретний зміст зазначених операцій обробки результатів конкретного виду вимірювання має певні відмінності.

3.1.1 Нехтування похибками та заокруглення похибок

При оцінюванні окремих складових похибок серед них можуть попадатися як більші, так і менші, а навіть і дуже малі, які практично не змінюють оцінки сумарної похибки. В цьому випадку такими похибками необхідно знехтувати. Прийняття рішення, що «даною похибкою можна знехтувати», або що «порівняно з іншою ця похибка є малою» не має однозначного теоретичного обґрунтування. Ці питання, а також тісно пов’язане з ними питання заокруглення похибок, залежать від вирішення іншого, загальнішого, питання, «як точно необхідно оцінювати похибки вимірювань». У практиці вимірювань метрологічні характеристики ЗВТ, умови вимірювань, властивості об’єкта досліджень та інші фактори процесу вимірювань можуть бути описані не абсолютно точно, а лише наближено. Тому, використовуючи апріорну і експериментальну наближену інформацію, неможливо не тільки абсолютно точно встановити значення вимірюваної величини, але й також неможливо точно оцінити характеристики похибок чи непевності (невизначеності) результату вимірювання. Тобто оцінки похибок результатів знаходять наближено, і власне це мають на увазі, коли говорять про «похибку від похибки». Щоб підкреслити наявність залишкової невизначеності похибки вимірювання говорять не про «визначення характеристик похибки», а про «оцінювання» її характеристик.

3.1.2 Умови нехтування малими похибками

У метрологічній практиці прийнято, що за звичайних вимірювань непевність оцінювання похибки може досягати до 10%-15% ($p_н$=1/10...≈1/7) від її значення. При високоточних вимірюваннях (наприклад, в метрологічних установах) допустиму непевність оцінки похибки зменшують до 5% ($p_н$=1/20) і навіть менше, а при технічних вимірюваннях – вона може досягати навіть і 20% ($p_н$=1/5).

На основі цього можна встановити умову нехтування «малими» похибками.

Систематичною похибкою нехтують, якщо вона порівняно з більшою не перевищує:

≈1/20 при високоточних метрологічних вимірюваннях;

≈1/10-1/7 при звичайних вимірюваннях;

≈1/5 при технічних вимірюваннях.

3.1.3 Нехтування випадковими похибками

При оцінюванні сумарного впливу випадкових похибок додають (з

урахуванням їх взаємної кореляції) їх дисперсії. Тому умова нехтування випадковою похибкою трансформується в умову, щоб стандартне відхилення сумарної похибки відрізнялося від стандартного відхилення не більше ніж на вказані вище значення.

За відсутності докладної інформації про коефіцієнт кореляції, як типове можна взяти його середньоквадратичне значення $r_{12,кв} = 1/\sqrt{3} \cong 0{,}58$. Тоді умови нехтування частково корельованих випадкових похибок можна прийняти, якщо відношення стандартних відхилень не перевищує

≈1/12 – при високоточних метрологічних вимірюваннях;

≈1/5 – при звичайних вимірюваннях;

≈1/3,5 – при технічних вимірювання.

При некорельованих похибках ці умови стають слабшими.

Такі самі вимоги застосовують при нехтуванні декількох похибок. При цьому для перевірки умов нехтування знаходять суму (для систематичних) чи сумарну дисперсію (з урахуванням кореляції) для випадкових похибок, якими нехтують, а також відповідні значення тих похибок, що залишаються.

3.1.4 Заокруглення похибок

Похибку заокруглення можна розглядати як окрему складову систематичної похибки, якою нехтують. Для кожного певного числового значення (наприклад, числа $\pi \approx 3{,}14159265...$) похибка заокруглення є систематичною. Тому спосіб заокруглення похибок безпосередньо випливає з умови нехтування малою систематичною похибкою: похибка від заокруглення похибки не може перевищувати значення, отримувані з умови нехтування. Якщо вимагати сталого значення максимальної абсолютної похибки заокруглення, то при різних значеннях самої похибки будемо отримувати різний вміст в ній похибки заокруглення різні відносні похибки заокруглення.

Якщо похибку заокруглювати згідно з прийнятими в математиці правил до однієї значущої цифри (q=1), то абсолютна похибка заокруглення справжнього значення похибки не перевищить половини даного десяткового розряду p похибки $\pm 0{,}5 \cdot 10^p$. Наприклад, $0{,}0349 \approx 0{,}03$ і похибка заокруглення є меншою за $0{,}5 \cdot 10^{-2}$ (старший розряд похибки – соті, p = –2). При заокругленні до двох значущих цифр (q = 2) похибка від заокруглення зменшиться в 10 раз, тобто буде знаходитися в межах $\pm 0{,}05\ 10^p$, і т.д. Заокруглюване значення A може змінюватися від 1 до 9,999... (гранично до 10) одиниць найстаршого розряду похибки. Тому відносна похибка заокруглення похибки набуде значення:

$$\delta_{\Delta,окр} = \frac{\pm 0{,}5 \cdot 10^{p-q+1}}{(1 \div 9{,}99) \cdot 10^p} 100\% = \frac{\pm 0{,}5 \cdot 10^{1-q}}{(1 \div 9{,}99)} 100\%. \qquad (3.1)$$

Звідси виходить, що при заокруглюванні похибок до однієї значущої цифри, максимальні значення похибок заокруглення становлять: 33,3% (перша значуща цифра яких починається з 1); 20% (перша значуща цифра 2); 14,3% (перша значуща цифра 3); 11,1% (перша значуща цифра 4); 9,1% (перша значуща цифра 5); 7,7% (перша значуща цифра 6); 6,7% (перша значуща цифра 7); 5,9% (перша

значуща цифра 8) і 5,5% (перша значуща цифра 9). Заокруглення до двох значущих цифр зменшує похибку у 10 раз, тобто їх максимальні значення дорівнюватиме 3,3%, 2,0%, 1,4% тощо.

Отже, використовуючи симетричний спосіб заокруглення, похибка заокруглення не перевищуватиме 10-15% (похибка від похибки) за умови, що її значення буде заокруглено так: якщо перша значуща цифра похибки є 1 або 2, то похибку заокруглюємо до двох значущих цифр, у всіх інших випадках – до однієї цифри.

Щоб не отримати необґрунтованого покращання якості результату вимірювання в певних випадках кінцеві оцінки похибок прийнято заокруглювати до більшого значення (вгору), наприклад, 0,83≈0,9; 1,24≈1,3. Тобто використовують одностороннє заокруглення, для якого максимальна похибка заокруглення не перевищить значення одиниці останнього розряду. Якщо поставити цю ж саму умову, щоб відносна похибка заокруглення не перевищувала 10-15%, то до двох значущих цифр необхідно заокруглювати похибки, у яких перша цифра є 1, 2, 3, 4, 5 і 6. У випадку обробки результатів технічних вимірювань, для яких умова нехтування систематичних похибок слабша і становить ≈1/5 (20%), то до двох значущих цифр необхідно заокруглювати похибки, у яких перша цифра є 1, 2, 3 і 4.

Однак формальне заокруглення вгору не у всіх випадках є оправданим. Зокрема, заокруглення похибки 5,01 до 6 (5,01≈6) навіть інтуїтивно виглядає не цілком коректним. Щоб уникнути таких ситуацій, за технічних вимірювань заокруглення похибок доцільно використовувати несиметричне заокруглення. А саме, якщо значення наступного розряду похибки є меншою за 0,2 (1/5 від одиниці попереднього розряду), то даний розряд залишаємо без змін, в протилежному випадку, заокруглюємо до більшого значення. Наприклад, 5,17≈5, а 5,21≈6. При такому несиметричному способі заокруглень, для того, щоб максимальна похибка заокруглення не перевищила 20% (1/5), до двох значущих цифр необхідно заокруглювати похибки, перші значущі цифри яких є 1, 2 і 3.

Приклади заокруглення похибок при технічних вимірюваннях: ±0,02723 мА ≈ ±0,028 мА; ±4,013 мВ ≈ ±4 мВ; ±0,531 °С ≈ ±0,6 °С; ±0,0905 мТл ≈ ±0,09 мТл; ±0,0925 мТл ≈ ±0,10 мТл; ±14,035 Вт ≈ ±14 Вт; ±1,09 Гц ≈ ±1,1 Гц; ±0,00316 с ≈ +0,0032 с; ±94,5 Ом = ±0,0945 кОм ≈±0,10 кОм. В останньому змінено одиницю (Ом) на кратну (кОм) з метою, щоб усунути не цілком коректний запис похибки ±94,5Ом≈±100Ом з трьома значущими цифрами (нулі в середині і в кінці числа вважаються значущими).

При лабораторних вимірюваннях дві значущі цифри треба залишати при заокругленні похибок, якщо перші значущі цифри яких лежать в діапазоні від 1 до 5. Нарешті, при обробці результатів відповідальних вимірювань рекомендують у всьому діапазоні заокруглювати похибку до двох значущих цифр.

Очевидно, що ці правила стосуються лише до прикінцевих оцінок похибок, а при ручному записуванні проміжних похибок необхідно залишати принаймні два додаткові значущі цифри похибки. При автоматизованій обробці результатів проміжні значення похибок не заокруглюють.

Важливість належного заокруглювання прикінцевих оцінок похибок і

результатів вимірювань полягає в тому, що при надлишкових розрядах похибки і результату (особливо це стосується результатів, отриманих при розрахунках на калькуляторі чи за допомогою програми комп'ютера) може створитися хибна думка про вищу, ніж справжня, точність вимірювання. Результат вимірювання заокруглюють так, щоб його молодший розряд відповідав молодшому розряду заокругленої абсолютної похибки.

3.1.5 Коригування систематичних похибок

Як вже було зазначено вище, виявлення і корекція систематичних похибок в результатах вимірювання (поправлення результатів вимірювань) є обов'язковим елементом їх обробки. Для кожного різновиду систематичних похибок існують свої методи зменшення їх впливу, однак існують загальні методи, які в тому чи іншому вигляді можна застосовувати для корекції систематичних похибок різного походження. Насамперед, типовими методами зменшують вплив систематичних похибок вимірювальних приладів. Розглянемо деякі з цих методів.

3.1.6 Зменшення впливу систематичних похибок внесенням поправок до показів приладу

Вимірювальні прилади періодично перевіряють (повіряють), при цьому основною метрологічною операцією є експериментальне оцінювання фактичних значень похибок в певних місцях шкали приладу (типово на оцифрованих відмітках аналогових приладів і цілих показах – цифрових приладів). Результатом метрологічної перевірки (повірки) є оцінки значень систематичних похибок на зазначених відмітках. Записані в таблицю з протилежним знаком експериментальні похибки утворюють таблицю поправок. Ці поправки можна враховувати під час виконання вимірювань для коригування систематичних похибок. Поправлений (скоригований) результат вимірювання отримують додаванням поправки p до показу:

$$x_к = x + p. \qquad (3.2)$$

При метрологічній перевірці (повірці) зразкові (еталонні) засоби є точнішими від тих, що перевіряють лише у 3-5 разів. Тому експериментально визначені фактичні похибки і, отже, поправки, не є ідеально точними. Крім того, якщо після метрологічної перевірки минув певний час, то похибки приладу дещо змінилися порівняно з тими значеннями, що були під час перевірки. Можна вважати, що після внесення поправки основна систематична похибка зменшується приблизно у 2-2,5 рази.

Оскільки метрологічну перевірку (повірку) приладів здійснюють в нормальних умовах, то внесення поправки до показу не зменшує додаткових систематичних похибок. При цьому їх значення слід оцінювати використовуючи не скориговану основну похибку.

Якщо показ приладу віддалений від оцифрованої відмітки, то, приймаючи до уваги плавний характер залежності систематичної похибки від показу, поправку до показу можна знайти інтерполяцією сусідніх поправок.

3.1.6 Зменшення впливу адитивної систематичної похибки приладу

Якщо прилад має сталу адитивну похибку Δ_0, а іншими похибками можна знехтувати, то показ прилад) при вимірюванні величини X становить:

$$x = x + \Delta_0. \tag{3.3}$$

Крім відомого показу x, в цьому рівнянні є дві невідомі: значення вимірюваної величини X та адитивна похибка Δ_0. Очевидно, що одного вимірювання для знаходження істинного значення X_i при двох невідомих недостатньо. Для корекції впливу адитивної похибки виконують ще одне вимірювання, при якому на вхід приладу подають довільне відоме значення X_0 і отримують показ, що спотворений цією ж адитивною похибкою:

$$x_0 = X_0 + \Delta_0. \tag{3.4}$$

З цих двох рівнянь можна виключити адитивну похибку і отримати значення вимірюваної величини:

$$X = x - x_0 + X_0. \tag{3.5}$$

Оскільки на значення X_0 ніяких обмежень не накладається, то його можна прийняти нульовим ($X_0 = 0$), наприклад, при вимірюванні напруги чи опору можна закоротити входи приладу. Тоді результат вимірювання:

$$X = x - x_0. \tag{3.6}$$

З цих виразів бачимо, що сталу адитивну похибку можна скоригувати теоретично повністю. Однак насправді ефективність корекції обмежена впливом в обох вимірюваннях різних випадкових похибок вимірювань ($\Delta_{в1}$, $\Delta_{в2}$) та похибок квантування ($\Delta_{кв1}$, $\Delta_{кв2}$). В результаті чого вираз для результату вимірювання набирає вигляду:

$$X = x - x_0 - \Delta_{в1} - \Delta_{кв1} + \Delta_{в2} + \Delta_{кв2}. \tag{3.7}$$

Якщо випадкові похибки у певних випадках можуть бути нехтовно малими, то похибка квантування (в цифрових приладах автоматично, в аналогових – оператором) є завжди. Тому така корекція адитивної похибки (і, як буде показано вище, загалом інших систематичних похибок) спричиняється до зростання впливу випадкових похибок і похибок квантування. Зокрема, якщо при одинокому вимірюванні дисперсія похибки становила σ_Δ^2, то в скоригованому результаті вимірювання є вже дві випадкові похибки, тому дисперсія результату становить $2\sigma_\Delta^2$ при статистично незалежних похибках і навіть $4\sigma_\Delta^2$ при їх тісній кореляції.

Граничне значення похибки квантування також зростає вдвічі.

Отже, корекцію систематичних похибок доцільно виконувати, якщо вплив випадкових похибок та похибок квантування порівняно з систематичною похибкою є малим. Інакше, замість покращення результату вимірювання можна отримати його погіршення.

3.1.7 Зменшення сумісного впливу систематичних адитивної та мультиплікативної похибок приладу

Якщо прилад, крім адитивної, має також сталу в часі мультиплікативну похибку $\delta_s X$, то показ приладу при вимірюванні величини *X* становить:

$$x = X + \Delta_0 + \delta_s X. \tag{3.8}$$

Крім відомого показу *x*, в цьому рівнянні з'явилася третя невідома мультиплікативна похибка $\delta_s X$. Очевидно, що для корекції впливу обох складових похибок необхідно виконати вже не одне, а два додаткові вимірювання різних значень X_{01} X_{02} відомої величини. В такому випадку отримують ще два рівняння:

$$x_1 = X_{01} + \Delta_0 + \delta_s X_{01}; \tag{3.9}$$

$$x_2 = X_{02} + \Delta_0 + \delta_s X_{02}, \tag{3.10}$$

розв'язуючи які, сумісно з попереднім, отримаємо значення вимірюваної величини теоретично без впливу систематичних похибок:

$$X = X_{01} + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}(X_{02} - X_{01}). \tag{3.11}$$

Якщо при першому додатковому вимірюванні $X_{01} = 0$ (закорочені входи), то

$$X = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} X_{02}. \tag{3.12}$$

Очевидно, як і при коригуванні лише адитивної похибки, на результат вимірювання впливають випадкові похибки і похибки квантування, тобто скоригований результат вимірювання:

$$X = \frac{x - \Delta_в - \Delta_{кв} - x_1 + \Delta_{в1} + \Delta_{кв1}}{x_2 - \Delta_{в2} - \Delta_{кв2} - x_1 + \Delta_{в1} + \Delta_{кв1}} X_{02}. \tag{3.13}$$

3.1.8 Корекція систематичних похибок приладу методом заміщення

Систематичну похибку, яка довільним чином залежить від вимірюваної величини найефективніше можна скоригувати методом заміщення. Суть методу

заміщення полягає у тому, що виконують два вимірювання (рис. 2.5).

Перше вимірювання – до входу приладу подають вимірювану величину X і отримують показ x, що містить систематичну похибку $\Delta(X)$:

$$x = X + \Delta(X). \tag{3.14}$$

Друге – до входу приладу під'єднують вихід міри X_m, регулюючи яку, добиваються попереднього показу приладу:

$$x_2 = X_m + \Delta(X_m) = x. \tag{3.15}$$

Прирівнюючи обидва результати, отримаємо значення вимірюваної величини:

$$X = X_m, \tag{3.16}$$

що теоретично дорівнює показу міри, а похибка вимірювання визначається похибкою міри ΔX_m. Фактично ж внаслідок дії випадкових похибок, похибок квантування, а також від впливу скінченної обмеженої чутливості приладу $(\Delta_ч)$, похибка вимірювана методом заміщення більша за похибку міри і становить:

$$\Delta_{тз} = \Delta X_m - \Delta_{в1} - \Delta_{кв1} + \Delta_{в2} + \Delta_{кв2} + \Delta_ч. \tag{3.17}$$

Особливістю методу заміщення є те, що він забезпечує коригування як основної, та і додаткових систематичних похибок приладу. Очевидно, що при оцінюванні похибки вимірювання методом заміщення за потреби необхідно враховувати також додаткові похибки міри. Складову похибки від обмеження чутливості можна визначити експериментально, регулюючи вихідну величину міри до моменту отримання вже помітного зміщення покажчика з попереднього положення або зміни показу цифрового приладу на 1-2 кванти.

3.1.9 Метод протиставлення

Такий метод застосовують при вимірюваннях з приладами зрівноважування, в яких є можливість переставити місцями вимірювану величину і регульовану міру. Наприклад, при зважуванні на терезах або при вимірюванні опору мостовим методом. Розглянемо останній приклад (рис. 3.1). Нехай при вимірюванні опору міст зрівноважили і отримали значення опору плеча порівняння $R_{пор1}$, тобто:

$$R_x = R_{пор1}\frac{R_A}{R_B}, \tag{3.18}$$

де $R_A R_B$ – опори пліч відношень моста, похибки яких треба скоригувати. Для цього в другому вимірюванні переставимо місцями вимірюваний опір і опір плеча

порівняння й знову зрівноважимо міст, звичайно при дещо іншому опорі плеча порівняння $R_{пор2}$, тобто:

$$R_{пор2} = R_x \frac{R_A}{R_B}. \tag{3.19}$$

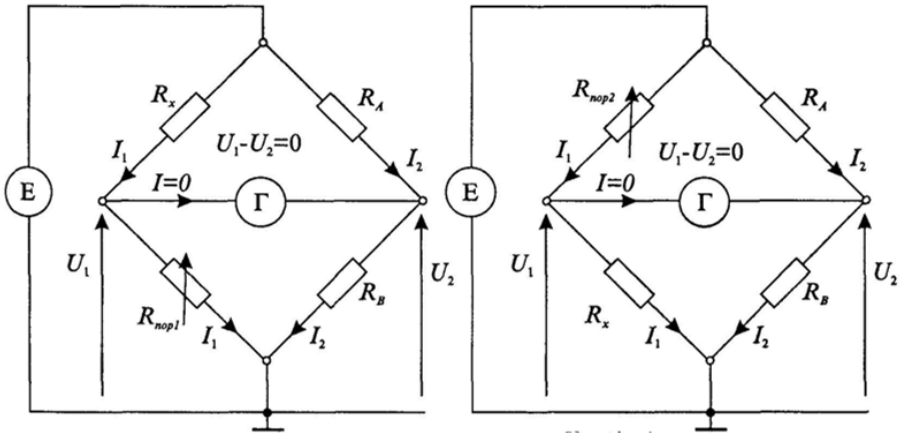


Рисунок 3.1 – До суті пояснення методу протиставлення

Розділивши одне рівняння на друге, отримаємо $\frac{R_x}{R_{пор2}} = \frac{R_{пор1}}{R_x}$, звідки значення вимірювального опору:

$$R_x = \sqrt{R_{пор1} \cdot R_{пор2}}, \tag{3.20}$$

яке теоретично залежить від опорів пліч відношення, тобто, їх похибок.

Залишкова відносна похибка δ_n результату вимірювання при застосуванні методу протиставлення визначається похибкою $\delta_м$ регульованої міри – плеча порівняння, а також його похибками квантування $\delta_{м,\text{ кв}}$:

$$\delta_п \cong \delta_м + \delta_{м,кв}. \tag{3.21}$$

3.1.10 Корекція прогресуючих похибок, метод симетричних в часі спостережень

Прогресуючою називають похибку, що в часі змінюється лінійно (зростає чи спадає). Оскільки загалом лінія описується двома параметрами: початковим значенням Δ_0 та крутизною s:

$$\Delta(t) = \Delta_0 + s \times t, \tag{3.22}$$

то враховуючи ще невідомі значення вимірюваної величини, для корекції прогресуючої похибки потрібно виконати принаймні три вимірювання.

Серед різних варіантів найпростішим є так званий метод симетричних спостережень в якому через рівні інтервали часу t_m виконують три вимірювання (рис. 3.2):

– в момент часу t_1, вимірюють відоме значення X_m вихідної величини міри і отримують показ:

$$x_1 = X_m + \Delta(t_1) = X_m + \Delta_0 + s \times t_1; \tag{3.23}$$

– в момент часу $t_2 = t_1 + t_m$ вимірюють значення X вимірюваної величини і отримують показ:

$$x_2 = X + \Delta(t_2) = X + \Delta_0 + s \times t_2 = X + \Delta_0 + s \times (t_1 + t_m); \tag{3.24}$$

– в момент часу $t_3 = t_2 + t_m = t_1 + 2t_m$ знову вимірюють це ж саме відоме значення X_m вихідної величини міри і отримують показ:

$$x_3 = X_m + \Delta(t_3) = X_m + \Delta_0 + s \times t_3 = X_m + \Delta_0 + s \times (t_1 + 2t_m). \tag{3.25}$$

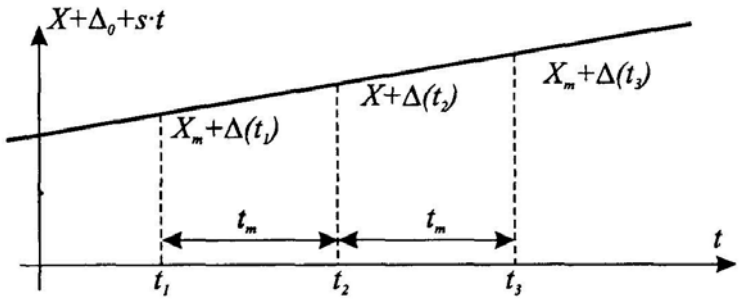


Рисунок 3.2 – Корекція прогресуючих похибок (метод симетричних спостережень)

Обчисливши середнє першого і третього результату:

$$\frac{x_1 + x_3}{2} = X_m + \Delta_0 + s \cdot \frac{t_1 + t_3}{2} = X_m + \Delta_0 + s \cdot (t_1 + t_m) = X_m + \Delta_0 + s \cdot t_2, \tag{3.26}$$

знаходять значення прогресуючої похибки в момент часу t_2, яке підставляють у друге рівняння і знаходять значення вимірюваної величини:

$$X = X_m + x_2 - \frac{x_1 + x_3}{2}. \tag{3.27}$$

Залишкова похибка методу симетричних спостережень визначається похибкою міри, а також випадковими похибками і похибками квантування у

кожному з трьох вимірювань:

$$\Delta_{с.сп.} = \Delta X_m - \Delta_{в2} - \Delta_{кв2} + \frac{\Delta_{в1} + \Delta_{кв1} + \Delta_{в3} + \Delta_{кв3}}{2}. \quad (3.28)$$

Зокрема, при нехтовно малих випадкових похибках, граничне значення залишкової похибки:

$$\Delta_{с.сп.гр} = \Delta X_{м,гр} + 2\Delta_{кв,гр}. \quad (3.29)$$

3.1.11 Підсумовування систематичних похибок

У переважній більшості практичних вимірювальних задач похибка вимірювання може бути описана як алгебрична сума декількох складових (наприклад, основних і додаткових похибок ЗВТ, методичних, особистих тощо), кожна з яких впливає на сумарну через певний коефіцієнт впливу c_i:

$$\Delta = c_1\Delta_1 + c_2\Delta_2 + ... + c_n\Delta_n = \sum_{i=1}^{n} c_i\Delta_i. \quad (3.30)$$

Цими складовими можуть бути як самі невідомі систематичні похибки, так і їх нескориговані залишки. Виникає задача оцінювання характеристик сумарної похибки, якщо відомі характеристики складових. За невеликої кількості складових похибки, зазвичай до чотирьох-п’яти, знаходять верхню оцінку похибки вимірювання, як її безумовне граничне значення. При цьому обчислюють суму граничних похибок аргументів (помножених на модулі коефіцієнтів впливу $|c_i|$):

$$\Delta_{гр} = \pm\left(|c_1||\Delta_{1гр}| + |c_2||\Delta_{2гр}| + ... + |c_n||\Delta_{nгг}|\right) = \pm\sum_{i=1}^{n}|c_i||\Delta_{iгг}|. \quad (3.31)$$

Якщо похибка вимірювання містить велику кількість складових, то мало ймовірно, щоб усі вони одночасно прийняли своє найбільше (граничне) значення та ще й всі з погодженими знаками. Тому для підсумовування великої кількості систематичних похибок використовують квазістатистичний підхід, який дає більш реалістичну оцінку похибки, якою є довірча похибка. Для цього необхідно мати значення дисперсій окремих складових σ_i^2, тоді довірчі границі можна оцінити за виразом:

$$\Delta_{дов} = \pm K(P_{дов}, n)\sqrt{\left(c_1^2\sigma_1^2 + c_1^2\sigma_2^2 + ... + c_n^2\sigma_n^2\right)} = \pm K(P_{дов}, n)\sqrt{\sum_{i=1}^{n} c_i^2\sigma_i^2}, \quad (3.32)$$

де $K(P_{дов}, n)$ – коефіцієнт, що залежить від довірчої ймовірності $P_{дов}$, розподілу складових і їх кількості n.

Якщо інформація про розподіл похибки відсутня, а відомі її лише граничні значення $\Delta_{iгр}$, то, зазвичай, приймається її рівномірний розподіл. Теоретично доведено, при відомих граничних значеннях саме похибки з рівномірним розподілом вносять найбільшу непевність результату. Тоді стандартне відхилення окремих складових $\sigma_i = \Delta_{i,гр} \big/ \sqrt{3}$ і довірчі границі похибки (невизначеність (непевність) результату):

$$\Delta_{дов} = \pm \frac{K\left(P_{дов,} n\right)}{\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} c_i^2 \Delta_{i,гр}^2}. \qquad (3.33)$$

Якщо кількість складових є понад 4-5, і серед них нема очевидно переважаючих над іншими, то в першому наближенні розподіл сумарної похибки можна прийняти нормальним, тому значення коефіцієнта $K\left(P_{дов,} n\right)$ вибирають як відповідні квантилі нормального розподілу: $K\left(P_{дов,} n\right) \approx 1{,}65$ ($P_{дов}$ = 0,9); $K\left(P_{дов,} n\right) \approx 1{,}96$ ($P_{дов}$ = 0,95, $n \geq 4$); $K\left(P_{дов,} n\right) \approx 2{,}58$ ($P_{дов}$ = 0,99, $n > 4...5$).

3.2 Обробка результатів прямих вимірювань

3.2.1 Обробка результатів прямих одноразових вимірювань

З погляду обробки результатів спостережень, пряме вимірювання – це вимірювання однієї величини, в якому її значення отримують безпосередньо за показом відповідного приладу без необхідних для знаходження значення вимірюваної величини додаткових обчислень. Приклади прямих вимірювань: вимірювання сили струму – амперметром, довжини лінійкою, інтервалу часу – годинником, температури – термометром тощо.

Значення вимірюваної величини вважається знайденим прямо, коли шкала вимірювального засобу проградуйована прямо у відповідних значеннях вимірюваної величини або посередньо через таблицю чи графік. Вимірювання є прямим навіть якщо необхідно виконати додаткові вимірювання впливових величин, наприклад, щоб зробити корекцію систематичних похибок.

Разові вимірювання виконують за умови невеликих випадкових похибок, коли переважаючими є систематичні похибки. При цьому, зазвичай, виконують декілька спостережень (3-4), щоб переконатись у стабільності результатів. Як результат вибирають один з них, не виконуючи якогось опрацювання. Основне рівняння такого вимірювання (залежність результату вимірювання у від результату спостереження *x*):

$$y = c \times x, \qquad (3.34)$$

де *c* – відомий коефіцієнт, наприклад, масштабний.

Для оцінювання характеристик похибки прямого разового вимірювання необхідно по можливості встановити всі складові, оцінити характеристики кожної і, використовуючи їх, знайти характеристики сумарної похибки. Модель похибки

вимірювання містить складові інструментальної похибки, а також, можливо, методичних і особистої (суб'єктивної), похибок експериментатора:

$$\Delta_y = \Delta_i + \Delta_м + \Delta_c = \Delta_{io} + \Delta_{iд} + \Delta_м + \Delta_c, \qquad (3.35)$$

де Δ_i – інструментальна похибка, яка містить основну (Δ_0) та додаткові ($\Delta_{iд}$) складові;

$\Delta_м$ – методична похибка;

Δ_c – суб'єктивна (особиста) похибка, яка зумовлена зчитуванням показу зі шкали аналогового приладу (під час вимірювання цифровими приладами ця складова похибки відсутня).

Якщо є можливість або потреба, то оцінюють одну чи декілька систематичних похибок і до результату вводять поправки (υ), в результаті чого отримують скоригований результат. Введення поправок не усуває повністю систематичних похибок, а лише їх зменшує в тій чи іншій мірі. Після введення поправок результат містить не скориговані залишки (інструментальної $\Delta_{iк}$, та методичної $\Delta_{мк}$) систематичних похибок:

$$\Delta_{yk} = \Delta_i + \Delta_м + \Delta_c - \upsilon_i - \upsilon_м = \Delta_{iк} + \Delta_{мк} + \Delta_c. \qquad (3.36)$$

Подальша обробка похибок здійснюється за методикою підсумовування систематичних похибок і результатів вимірювання записують як:

$$X = \left(x \pm \Delta_{гр}\right) \text{ або } X = \left(x \pm \Delta_{дов}\right),\ P_{дов} = ..., \qquad (3.37)$$

де x – значення, знайдене під час вимірювань.

3.2.2 Обробка результатів прямих багаторазових вимірювань. Зменшення впливу випадкових похибок

Основним методом зменшення впливу випадкових похибок є проведення вимірювань з багаторазовими спостереженнями і подальша статистична обробка отриманих результатів. Методика статистичної обробки залежить від статистичних властивостей випадкових похибок, зокрема, їх розподілу, корельованості тощо. В переважній більшості практичних застосуваннях приймають моделі нормального розподілу випадкових похибок, що дає можливість застосовувати до обробки результатів добре теоретично обґрунтовані статистичні методи. Найбільш ефективним методом у зменшенні впливу на результат вимірювання нормально розподілених похибок є усереднення результатів.

Якщо в цьому конкретному вимірюванні заздалегідь невідомий розподіл випадкових похибок, то необхідно провести детальні дослідження на предмет встановлення форми розподілу. При цьому застосовують відповідні статистичні критерії і для досягнення заданого рівня впевненості про вид розподілу необхідно виконати великий обсяг вимірювальних експериментів, навіть кілька сотень і більше. Найчастіше на основі експериментальних даних спочатку будують

гістограму і за її формою роблять попередній висновок про вид розподілу. Далі на основі критеріїв χ^2, Колмогорова чи іншого перевіряють гіпотезу на належність даного розподілу до вибраного модельного. Слід зауважити, що ніякий критерій не дає гарантії про підпорядкованість даної сукупності експериментальних даних тому чи іншому розподілу, лише отримується відповідь, що з такою ймовірністю такий розподіл не суперечить експериментальним результатам.

3.2.3 Обробка результатів при нормально розподілених випадкових похибках

Найбільш поширена як в теоретичних дослідженнях, так і при практичній обробці результатів є модель нормального розподілу випадкових похибок. При вимірюваннях сталого значення величини X вплив випадкових похибок Δ_i появляється у хаотичній, нерегулярній зміні окремих послідовних в часі результатів x_i, (i = 1, 2, ... , n), де n – кількість результатів спостережень:

$$x_i = X + \Delta_i. \tag{3.38}$$

Прийнято вважати, що кількість спостережень при багаторазових вимірюваннях не менша за 4-5 $(n \geq 4-5)$. В результаті почергових вимірювань даної величини отримують набір результатів:

$$x_1, x_2, x_3, x_4, ..., x_n. \tag{3.39}$$

Для зменшення впливу нормально розподілених випадкових похибок застосовується усереднення результатів спостережень, тобто за результат вимірювання приймається їх середнє значення:

$$X \approx \bar{x}(n) = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + ... + x_n}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \tag{3.40}$$

тут індекс (n) означає знаходження середнього з п спостережень.

Методика подальшої обробки, зокрема з метою оцінювання довірчих границь непевності отриманого результату, залежить від апріорної інформації про характеристики похибок результатів спостережень. Розглянемо обробку результатів при рівноточних вимірюваннях. Рівноточними вважаються почергові вимірювання незмінними засобами, в незмінних умовах, тим самим експериментатором.

Якщо дисперсія (чи стандартне відхилення) випадкових похибок заздалегідь невідомі, то:

– за оцінку результату вимірювання беруть середнє;

– оцінюють вибіркову дисперсію випадкових похибок результатів спостережень:

$$S_x^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x}(n) \right)^2; \tag{3.41}$$

– перевіряють найбільш відхилені від середнього значення результати спостережень на можливість їх спотворення грубими похибками чи наявність промахів. При потребі такі результати відкидають і повторно виконують перші два пункти при скороченій (на кількість відкинутих результатів) виборці;

– оцінюють дисперсію випадкової похибки результату вимірювання (середнього значення), що в п раз менша за оцінку дисперсії окремих результатів спостережень:

$$S_{\bar{x}}^2 = \frac{S_n^2}{n} = \frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x}(n) \right)^2; \tag{3.42}$$

– оцінюють стандартне відхилення випадкової похибки результату вимірювання, що в корінь квадратний з кількості результатів $\sqrt{n}$ менша від стандартного відхилення похибок результатів спостережень:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{S_n^2}{n}} = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x}(n) \right)^2}; \tag{3.43}$$

– оцінюють довірчі границі похибки (невизначеність (непевність) результату вимірювання):

$$\Delta_{\bar{x}} = \pm t\left(n-1, P_{дов}\right) \cdot S_{\bar{x}} = \pm t\left(n-1, P_{дов}\right) \cdot \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \tag{3.44}$$

де $t\left(n-1, P_{дов}\right)$ – коефіцієнт, що взятий з таблиці для розподілу Стьюдента, що залежить від так званої кількості ступенів вільності *f*, яка в цьому випадку дорівнює $f = n-1$, та довірчої ймовірності $P_{дов}$ (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнтів *t* Стьюдента

f	*P*			*f*	*P*		
	0,90	0,95	0,99		0,90	0,95	0,99
3	2,353	3,182	5,841	19	1,729	2,093	2,961
4	2,132	2,776	4,604	20	1,725	2,086	2,845
5	2,015	2,571	4,032	21	1,721	2,080	2,831
6	1,943	2,447	3,707	22	1,717	2,074	2,819
7	1,895	2,365	3,499	23	1,714	2,069	2,807
8	1,860	2,306	3,355	24	1,711	2,064	2,797
9	1,833	2,262	3,250	25	1,708	2,060	2,787
10	1,812	2,228	3,169	26	1,706	2,056	2,779
11	1,796	2,201	3,106	27	1,703	2,052	2,771

Продовження таблиця 3.1

f	P			f	P		
	0,90	0,95	0,99		0,90	0,95	0,99
12	1,782	2,179	3,055	28	1,701	2,048	2,763
13	1,771	2,160	3,012	29	1,699	2,045	2,756
14	1,761	2,145	2,977	30	1,697	2,042	2,750
15	1,753	2,131	2,947	40	1,684	2,021	2,704
16	1,746	2,120	2,921	60	1,671	2,000	2,660
17	1,740	2,110	2,898	120	1,658	1,980	2,617
18	1,734	2,103	2,878	∞	1,645	1,960	2,576

Якщо кількість результатів спостережень становить кілька десятків (звичайно більше 30), то розподіл Стьюдента практично трансформується в нормальний і тоді довірчі границі непевності (невизначеності) результату можна оцінити за відповідним квантилями нормального розподілу.

Дисперсія $D = \sigma^2$ випадкових похибок може бути відома з попередніх досліджень, що виконувалися тими самими засобами в таких самих умовах. Тоді:

– результат вимірювання також знаходять як середнє з отриманих результатів первинних вимірювань;

– перевіряють результати на наявність грубих похибок, і за потреби відкидають такі результати. Повторно оцінюють середнє значення;

– оцінку довірчих границь (невизначеності (непевності) результату вимірювання) розраховують за виразом:

$$\Delta_{\bar{x}} = \pm z_{н}\left(P_{дов}\right) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \tag{3.45}$$

де $z_{н}\left(P_{дов}\right)$ – квантиль нормального розподілу.

Результат вимірювання записують у стандартній формі:

$$X = \bar{x}(n) \pm \Delta_{\bar{x}}, \qquad P_{дов} = ..., \; n = ..., \; норм. \tag{3.46}$$

Отже, для зменшення впливу випадкових похибок знаходять середнє значення з результатів спостережень. При цьому розкид середнього значення (стандартне відхилення) в $\sqrt{n}$ менший за розкид окремого результату спостереження. Отже, для зменшення впливу випадкової похибки у n раз необхідно здійснити n^2 спостережень, зокрема для зменшення випадкової похибки в 10 раз необхідно провести $10^2=100$ спостережень, а у 100 раз – $100^2=10000$ спостережень. Очевидно, що збільшення кількості спостережень спричиняється до пропорційного зростання часу вимірювання.

3.3 Сумісне підсумовування систематичних та випадкових похибок

На практиці на результати вимірювання часто впливають одночасно як випадкові, так і систематичні похибки. Звичайно обидві складові похибки вимірювання оцінюють окремо. Оцінку систематичної похибки вимірювання (або її не скоригованого залишку) знаходять у формі безумовних границь $\Delta_{с.гр}$ (при невеликій кількості складових) або довірчих границь $\Delta_{с.дов}$ (при кількості складових понад 4-5). Випадкову складову, зазвичай, характеризують довірчими границями $\Delta_{в.дов}$. Довірчі границі сумарної похибки переважно знаходять як суму безумовних чи довірчих границь систематичної та довірчих границь випадкової похибок:

$$\Delta_{\sum дов} = \Delta_{с.гр} + \Delta_{в.дов}, \text{ або } \Delta_{\sum дов} = \Delta_{с.дов} + \Delta_{в.дов}. \quad (3.47)$$

Якщо довірчі ймовірності систематичної та випадкової похибок різні, то необхідно перерахувати відповідні границі, або, в разі неможливості, слід прийняти меншу довірчу ймовірність.

Частіше застосовують квазістатистичний підхід до підсумовування систематичної та випадкової похибок. Це має сенс, якщо систематична похибка містить нескориговані залишки змінних складових. Для знаходження невизначеності (непевності) результату (довірчого інтервалу сумарної похибки) застосовують дещо різні підходи. Найчастіше його знаходять за виразом:

$$\Delta_{\sum дов} = K(P_{дов}, \nu)[\Delta_{с.дов} + \Delta_{в.дов}], \quad (3.48)$$

де $K(P_{дов}, \nu)$ – коефіцієнт, що залежить від відношення границі систематичної похибки до стандартного відхилення випадкової похибки $\nu = \Delta_{с.дов} / S_в$.

Якщо виконується умова $0{,}8 \le \nu \le 8$, то можна використати значення коефіцієнта $K(0{,}95) = 0{,}8$ і $K(0{,}99) = 0{,}85$. Якщо ж $\nu < 0{,}8$, то систематичною похибкою нехтують і за границю сумарної приймають границю випадкової похибки, а при $\nu > 8$, нехтують випадковою складовою похибки і залишають лише систематичну.

Використовують також іншу емпіричну формулу підсумовування:

$$\Delta_{\sum дов} = K_{\Sigma}(P_{дов}) S_{\Sigma}, \quad (3.49)$$

де $S_{\Sigma} = \sqrt{S_с^2 + S_в^2}$ – оцінка сумарного стандартного (середньо-квадратичного) відхилення похибки;

$K_{\Sigma}(P_{дов}) = \dfrac{\Delta_{с.дов} + \Delta_{в.дов}}{S_с + S_в}$ – коефіцієнт, що залежить від співвідношення суми границь систематичної та випадкової похибок при одній і ті ж довірчій

ймовірності до суми їх стандартних відхилень.

За однакового розподілу систематичної та випадкової похибок, найчастіше нормальному, цей коефіцієнт є відповідним квантилем відповідного, розподілу, зокрема нормального – $K_{\Sigma}(P_{дов}) = z_{н}(P_{дов})$.

3.4 Обробка результатів опосередкованих вимірювань

3.4.1 Обробка результатів опосередкованих вимірювань з разовим вимірюванням аргументів

При опосередкованих вимірюваннях значення величини Y знаходять за результатами безпосередніх вимірювань величин X_1, X_2, X_3,...X_n які пов'язані з нею функціональною залежністю:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, ...X_n). \tag{3.50}$$

Разові опосередковані вимірювання виконують за невеликих випадкових похибок, тобто, при стабільних почергових результатах вимірювань кожної величини. Будемо вважати, що результати вимірювань x_1, x_2, x_3, …, x_n. Результат опосередкованого вимірювання отримують підстановкою результатів первинних вимірювань величин – аргументів у відповідне рівняння вимірювання:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, ...x_n). \tag{3.51}$$

Прикладом опосередкованого вимірювання є визначення опору R_x споживача в режимі його роботи за результатами прямих вимірювань напруги U_V вольтметром, струму I_A амперметром за законом Ома:

$$R_x = \frac{U_V}{I_A}. \tag{3.52}$$

Для записування результату вимірювання необхідно оцінити похибку його визначення.

3.4.2 Вираз (модель) похибки опосередкованого вимірювання

Оцінювання похибки опосередкованого вимірювання відбувається у такій послідовності:

– знаходження виразу похибки;

– оцінювання характеристик окремих складових похибок вимірювань величин-аргументів, за необхідності корекція їх похибок;

– оцінювання характеристик сумарної похибки;

– записування результату з вказанням його невизначеності (непевності), (довірчих границь).

Вираз похибки отримують з рівняння вимірювання, розкладаючи його в околі результатів вимірювання аргументів в ряд Тейлора. При цьому приймають,

що похибки вимірювань величин аргументів $\Delta_1,\Delta_2,\Delta_3,...\Delta_4$ невеликі, тобто, у розкладі обмежуються лише лінійними членами розкладу:

$$\Delta y \cong \frac{\partial f}{X_1}\Delta_1 + \frac{\partial f}{X_2}\Delta_2 + \frac{\partial f}{X_3}\Delta_3 + ... + \frac{\partial f}{X_n}\Delta_n + \Delta_м. \quad (3.53)$$

Тут $\Delta_м$ – методична похибка, що зумовлена невідповідністю функціональної залежності $Y = f(X_i)$ справжній залежності між величинами.

Або в загальному випадку вираз похибки набирає вигляду:

$$\Delta y \cong \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f(x_1, x_2, ..., x_n)}{\partial X_i}\Delta_i + \Delta_м = \sum_{i=1}^{n} C_i\Delta_i + \Delta_м, \quad (3.54)$$

де $C_i = \partial f \left| dX_i \right|_{x_1, x_2, ..., x_n}$ – часткова похідна функції за *i*-м аргументом, обчислена при аргументах, які дорівнюють їх результатам вимірювань $(X_i = x_i,\ i = 1,2,...,n)$. Цю похідну часто називають коефіцієнтом впливу похибки *i*-го аргументу Δ_i, на похибку вимірювання Δy.

Знаючи Δy можна записати також вираз відносної похибки:

$$\delta_y = \frac{\Delta y}{y} \cong \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f(x_1, x_2, ..., x_n)}{\partial X_i}\Delta_i}{f(x_1, x_2, ..., x_n)} + \frac{\Delta_м}{f(x_1, x_2, ..., x_n)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i x_i \delta_i}{f(x_1, x_2, ..., x_n)} + \frac{\Delta_м}{f(x_1, x_2, ..., x_n)}. \quad (3.55)$$

Отже, вирази похибки опосередкованого вимірювання залежать від вигляду рівняння вимірювання (функції) і часто в одних випадках вираз абсолютної похибки є значно простішим, ніж відносної, а в інших, – навпаки. Можна застосовувати такі загальні рекомендації: якщо рівняння вимірювання містить добутки, частку, піднесення до степеня, добування коренів, то доцільно оперувати відносною похибкою, якщо ж рівняння вимірювання є алгебричною сумою, чи містить інші, ніж перераховані вище нелінійні функції, то доцільно оперувати абсолютною похибкою. В багатьох випадках доцільно використовувати комбінований підхід.

На практиці похибка вимірювання кожного з аргументів, зазвичай, містить декілька складових (зокрема, основну, додаткові, особисту, методичну тощо), тому навіть при двох аргументах загальна кількість складових похибки може бути досить великою (5, 6 і більше). В цьому випадку для підсумовування похибок використовують статистичний підхід, який дає більш реалістичну оцінку похибки, якою є довірча похибка. При центрованих (з нульовим середнім значенням, точніше – математичним сподіванням) і статистично незалежних (некорельованих) складових похибки довірчу границю похибки вимірювання

(невизначеність (непевність) результату) при заданій вірогідності (довірчій ймовірності $P_{дов}$) обчислюють за виразом:

$$\Delta y_{дов} = \pm K(P_{дов}, n)\sqrt{\sum_{i=1}^{n} C_i^2 \sigma_i^2} = \pm K(P_{дов}, n)\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 \sigma_i^2}\,. \qquad (3.56)$$

Якщо відомі лише граничні значення похибок $\Delta_{iгр}$, то, орієнтуючись на найгірший випадок, розподіл складових приймають рівномірний з середнім квадратичним значенням похибок $\sigma_i = \frac{\Delta_{i.гр}}{\sqrt{3}}$. Тоді довірчі границі оцінки похибки вимірювання (невизначеність (непевність) результату) можна порахувати за виразом:

$$\Delta y_{дов} = \pm \frac{K(P_{дов}, n)}{\sqrt{3}}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 \Delta_{i.гр}^2}\,. \qquad (3.57)$$

3.4.3 Опосередковані вимірювання з багаторазовими спостереженнями аргументів

Такі вимірювання виконують з метою зменшення впливу випадкових похибок вимірювань кожного з аргументів X_1, X_2, X_3,...X_n, для цього їх вимірюють багаторазово. При цьому спосіб обробки результатів первинних вимірювань залежить від виду функціональної залежності між безпосередньо вимірюваними величинами.

Можливі два типи опосередкованих вимірювань. Перший – результати вимірювань аргументів незалежні між собою, наприклад, як при визначенні питомої густини матеріалу ρ_v безпосереднім вимірюванням об'єму V та маси m тіла:

$$\rho_v = \frac{m}{V}, \qquad (3.58)$$

або визначення питомого електричного опору провідника ρ_e шляхом безпосереднім вимірюванням його опору R, довжини L та діаметра D:

$$\rho_e = \frac{R\pi D^2}{4L}. \qquad (3.59)$$

У цих прикладах кожну з величин можна вимірювати незалежно від інших, навіть в різний час, результат вимірювання однієї ніяк не впливає на результат вимірювання іншої. При вимірюванні кожного аргументу кількість спостережень може бути різною, наприклад, залежною від рівня випадкової похибки

вимірювання даної величини (де більша випадкова похибка доцільно збільшити обсяг спостережень).

До другого типу належать вимірювання, в яких результати вимірювань взаємозалежні і мають зміст лише разом. Прикладом такого вимірювання є згадане вище вимірювання електричного опору, використовуючи закон Ома:

$$R_x = \frac{U_V}{I_A}. \tag{3.60}$$

У цьому випадку напругу та струм необхідно вимірювати одночасно, оскільки зміна напруги спричиняється до зміни струму і навпаки. Кількість вимірювань кожної з величин мусить бути однакова і результати спостережень мають бути записані разом для кожного окремого експерименту.

Обробку результатів опосередкованого вимірювання з незалежними результатами вимірювань аргументів виконують у такій послідовності:

– результати спостережень кожного з аргументів опрацьовують за методикою обробки результатів прямих вимірювань з багаторазовими спостереженнями і знаходять оцінки результатів $\overline{x}_i$, і середньоквадратичних відхилень S_{i,n_i} (n_i – кількість спостережень при прямому вимірюванні величини X_i);

– результат опосередкованого вимірювання знаходять підстановкою оцінок результатів вимірювань аргументів у рівняння вимірювання:

$$y = f\left(\overline{x}_1, \overline{x}_2, \overline{x}_3, ...\overline{x}_n\right). \tag{3.61}$$

– враховуючи рівняння вимірювання, аналогічно як при разових вимірюваннях, знаходять вираз похибки:

$$\Delta y \cong \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f\left(x_1, x_2, ..., x_n\right)}{\partial X_i} \Delta_i + \Delta_м = \sum_{i=1}^{n} C_i \Delta_i + \Delta_м, \tag{3.62}$$

де $\Delta_м$ – методична похибка, що зумовлена невідповідністю функціональної залежності справжній залежності між величинами;

$C_i = \partial f \left| dX_i \right|_{x_1, x_2, ..., x_n}$ – часткова похідна функції за i-м аргументом (коефіцієнт впливу похибки i-го аргументу Δ_i на похибку вимірювання Δy).

– оцінюють методичну похибку і в разі потреби її коригують і оцінюють не скоригований залишок;

– для заданої довірчої ймовірності розраховують довірчі границі похибки опосередкованого вимірювання (невизначеність (непевність) результату):

$$\Delta y_{дов} \pm t\left(n_{ef}, P_{дов}\right) \sqrt{\sum_{i=1}^{k} C_i^2 \frac{S_{i,n_i}^2}{n_i}}, \tag{3.63}$$

де $t(n_{ef}, P_{дов})$ – квантиль розподілу Стьюдента для ефективної кількості результатів спостережень n_{ef},

– записують результат вимірювання:

$$Y = (y \pm \Delta y_{дов}); . P_{дов} = ..., n_{ef} = ... \quad (3.64)$$

Обробку результатів при залежних вимірюваннях аргументів здійснюють у такій послідовності:

– для кожної групи результатів вимірювань різних аргументів підстановкою в рівняння вимірювання знаходять відповідне значення шуканої величини:

$$y_i = f(x_{1,i}, x_{2,i}, x_{3,i}, ...x_{n,i}); \quad (3.65)$$

– отримані результати y_i, опрацьовують як за прямих вимірювань з багаторазовими спостереженнями і знаходять оцінку результату вимірювання $\overline{y}$, і середньоквадратичне відхилення S_n (n – кількість груп спостережень, або кількість значень величини y);

– для заданої довірчої ймовірності розраховують довірчі границі похибки опосередкованого вимірювання (невизначеність (непевність) результату:

$$\Delta y_{дов} \pm t(n-1, P_{дов}) \sqrt{\frac{S_n^2}{n}}, \quad (3.66)$$

– записують результат вимірювання:

$$Y = (y \pm \Delta y_{дов}); . P_{дов} = ..., n = ... \quad (3.67)$$

У разі одночасного впливу на результат вимірювання систематичних та випадкових похибок, їх сумісне підсумовування здійснюють за методикою, викладеною вище.

3.5 Обробка результатів сумісних вимірювань. Вимірювання параметрів залежностей між фізичними величинами

3.5.1 Наближення (апроксимація) результатів експериментів функціями

Нагадаємо, що сумісні вимірювання використовують для знаходження функціональних залежностей між декількома фізичними величинами, в найпростішому між двома X та Y (рис. 3.3) $Y(X) = F(X)$.

Загалом ця функція може бути як лінійною (рис. 3.4), так і нелінійною (рис. 3.3) відносно як незалежного аргументу X, так і шуканих коефіцієнтів. Апроксимаційну функцію:

$$Y(X) = F_a[a_0, a_1, ..., a_{m-1}; X] \tag{3.68}$$

розглядають як модель справжньої функціональної залежності $Y(X)$ і вона є функцією *m*-невідомих коефіцієнтів $a_0, a_1, ..., a_{m-1}$, які необхідно знайти під час обробки результатів сумісних вимірювань.

Внаслідок відмінності апроксимаційної функції від справжньої залежності (навіть за відсутності похибок вимірювань) існує методична похибка апроксимації (наближення), тобто похибка прийнятої моделі функціонально залежності:

$$\Delta_a(X) = F_a[a_0, a_1, ..., a_{m-1}; X] - Y(X). \tag{3.69}$$

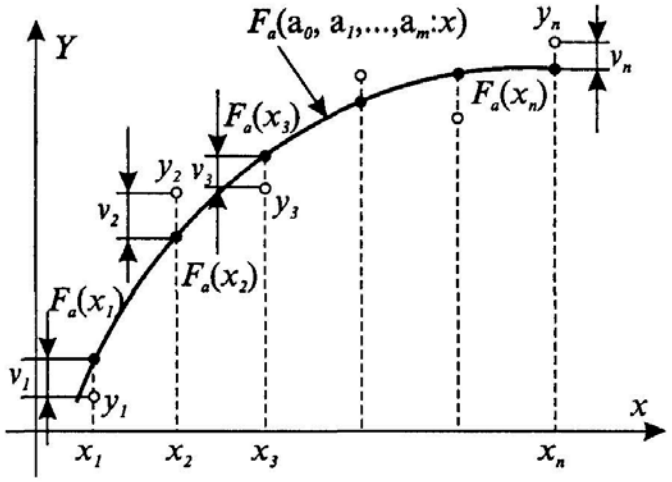


Рисунок 3.3 – До апроксимації результатів експериментів

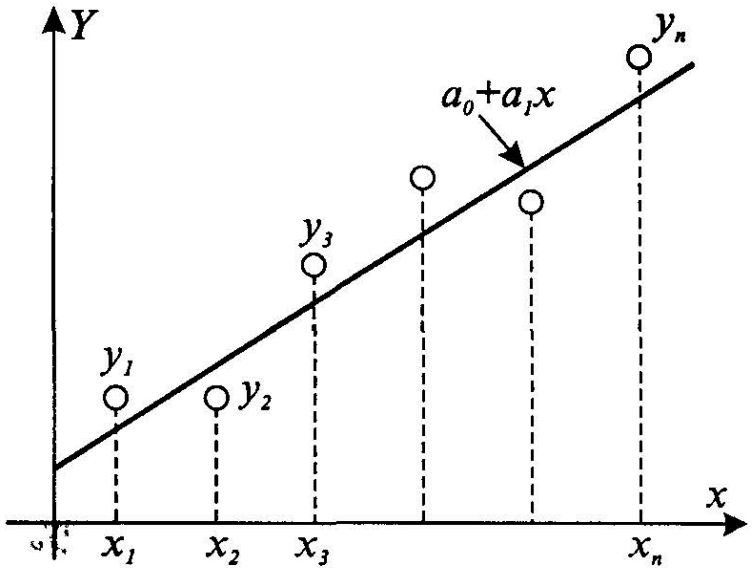


Рисунок 3.4 – Лінійна апроксимація МНК

Кажуть, що модель є відповідною чи адекватною, якщо похибкою моделі чи апроксимації можна знехтувати, або вона не перевищує заданого допустимого значення $\Delta_{a,доп}$:

$$\left|\Delta_a(X)\right| \le \Delta_{a,доп}. \tag{3.70}$$

За умови адекватної моделі, для знаходження коефіцієнтів апроксимуючої функції для заданих п значень аргументу x_1, x_2,..., x_n і вимірюють відповідні їм значення функції y_1, y_2,..., y_n в результаті чого формують систему рівнянь:

$$\left.\begin{array}{l} y_1 = F_a[a_0, a_1, ..., a_{m-1}; x_1]; \\ y_2 = F_a[a_0, a_1, ..., a_{m-1}; x_2]; \\ \ldots \qquad\qquad \ldots \\ y_n = F_a[a_0, a_1, ..., a_{m-1}; x_n]; \end{array}\right\}, \tag{3.71}$$

розв'язками якої є шукані коефіцієнти $a_0, a_1, ..., a_{m-1}$. При цьому кількість рівнянь n системи (кількість вимірювань п пар аргумент-функція) має бути не меншою за кількість невідомих коефіцієнтів m, тобто $n \ge m$.

Очевидно, що в загальному випадку результати вимірювань спотворені різного роду похибками. Тому виникає проблема побудови «найкращої» за даних умов апроксимаційної залежності.

3.5.2 Метод найменших квадратів

На практиці шукану залежність будують так, щоб мінімізувати певну функцію її відхилень від експериментальних точок (рис. 3.3):

$$v_i = F_a[a_0, a_1, ..., a_{m-1}; X] - y_i, \tag{3.72}$$

при цьому широко вживається критерій мінімуму суми квадратів відхилень шуканої функції від експериментальних точок, тобто:

$$MIN\left\{\sum_{i=1}^{n} v_i^2\right\}. \tag{3.73}$$

Завдяки тому, що за цим критерієм мінімізується сума квадратів відхилень шуканої функції від експериментальних точок, то він отримав назву методу найменших квадратів (МНК).

Як відомо, для аналітичного знаходження параметрів, при яких функція набуває мінімуму, необхідно спочатку обчислювати похідні за всіма параметрами функції, далі прирівняти їх до нуля і, нарешті, розв'язати отриману систему рівнянь. Оскільки похідна від квадрату є однозначною лінійною функцією, то за умови, що апроксимуюча функція $F_a[a_0, a_1, ..., a_{m-1}; X]$ є лінійною відносно

коефіцієнтів $a_0, a_1, ..., a_{m-1}$, задача апроксимації зводиться до розв'язування системи лінійних рівнянь.

3.5.3 Лінійна апроксимація

Найпростішою є лінійна апроксимація $y(x) = a_0 + a_1 x$ (рис. 3.4). В цьому випадку відхиленні *i*-ї точки описується виразом $v_i = a_0 + a_1 x_i - y_i$, і умова мінімуму суми квадратів відхилень набирає вигляду:

$$MIN\left\{V = \sum_{i=1}^{n} v_i^2\right\} = MIN\left\{V = \sum_{i=1}^{n} (a_0 + a_1 x_i - y_i)^2\right\}, \tag{3.74}$$

яка досягається при значеннях $\hat{a}_0, \hat{a}_1$ коефіцієнтів, які будуть щораз іншими для іншого набору результатів вимірювань.

Для знаходження умови мінімуму беруть похідні по кожному з коефіцієнтів $\hat{a}_0, \hat{a}_1$ і прирівнюють їх до нуля:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial \hat{a}_0} &= 2\sum_{i=1}^{n} (\hat{a}_0 + \hat{a}_1 x_i - y_i) = 0; \\ \frac{\partial V}{\partial \hat{a}_1} &= 2\sum_{i=1}^{n} (\hat{a}_0 + \hat{a}_1 x_i - y_i) x_i = 0; \end{aligned}\right\}. \tag{3.75}$$

Після розкриття операції підсумовування та виконання перестановок, отримують систему лінійних рівнянь відносно оцінок шуканих коефіцієнтів $\hat{a}_0, \hat{a}_1$:

$$\left.\begin{aligned} \hat{a}_0 n + \hat{a}_1 \sum_{i=1}^{n} x_i &= \sum_{i=1}^{n} y_i; \\ \hat{a}_0 \sum_{i=1}^{n} x_i + \hat{a}_1 \sum_{i=1}^{n} x_i^2 &= \sum_{i=1}^{n} y_i x_i; \end{aligned}\right\} \quad \textit{або} \quad \left.\begin{aligned} \hat{a}_0 + \hat{a}_1 \bar{x} &= \bar{y}; \\ \hat{a}_0 \bar{x} + \hat{a}_1 \overline{x^2} &= \overline{yx}. \end{aligned}\right\}, \tag{3.76}$$

де $\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$ – середнє значення аргументів; $\overline{x^2} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2$ – середнє значення квадратів аргументів;

$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$ – середнє значення експериментальних значень функції;

$\overline{yx} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i x_i$ – середнє значення добутків експериментальних значень функції на значення відповідних аргументів.

Розв'язанням цієї системи є оцінки коефіцієнтів функції:

$$\hat{a}_0 = \frac{\overline{x^2}\cdot\overline{y} - \overline{x}\cdot\overline{y\cdot x}}{\overline{x^2} - \left(\overline{x}\right)^2}; \qquad \hat{a}_1 = \frac{\overline{yx} - \overline{y}\cdot\overline{x}}{\overline{x^2} - \left(\overline{x}\right)^2}. \tag{3.77}$$

Якщо відомі дисперсії $\sigma^2_{\Delta y}$ випадкових похибок вимірювання значень функції, то дисперсії знайдених коефіцієнтів можна порахувати за виразами:

$$\sigma^2_{\hat{a}_0} = \frac{\overline{x^2}}{\overline{x^2} - \left(\overline{x}\right)^2}\frac{\sigma^2_{\Delta y}}{n}; \qquad \sigma^2_{\hat{a}_1} = \frac{1}{\overline{x^2} - \left(\overline{x}\right)^2}\frac{\sigma^2_{\Delta y}}{n}, \tag{3.78}$$

які зменшуються зі збільшенням кількості експериментальних точок.

Загалом похибки знайдених коефіцієнтів є корельованими між собою, при чому коефіцієнт кореляції між ними становить $R_{a_0 a_1} = -\frac{\overline{x}}{\overline{x^2} - \left(\overline{x}\right)^2}\frac{\sigma^2_{\Delta y}}{n}$. З останнього випливає, що кореляція поміж коефіцієнтами буде відсутня в разі нульового середнього значення аргументів $\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i = 0$, тобто, їх симетрії відносно початку координат.

Довірчі границі похибок (за довірчої ймовірності $P_{дов}$) (невизначеність) отриманих оцінок коефіцієнтів функції знаходять за виразом:

$$a_j = \hat{a}_j \pm t\left(n-m, P_{дов}\right)\sigma_{a_j}, \tag{3.79}$$

де $t\left(n-m, P_{дов}\right)$ – квантиль розподілу Стьюдента з числом ступенів вільності *n–m.* Якщо дисперсія випадкових похибок $\sigma^2_{\Delta y}$ наперед невідома, то її оцінюють під час обробки результатів.

3.6 Обробка результатів сукупних вимірювань

3.6.1 Задачі сукупних вимірювань

Серед ЗВТ існують так звані набори мір. Хоча кожна міра з цього набору може застосовуватися окремо, однак основне призначення таких наборів є їх сукупне використання. Наприклад, багатогранну призму застосовують для калібрування кутів, при цьому в кожному конкретному випадку в калібруванні може брати участь один, два чи більше сусідніх кутів призми. Оскільки у калібруванні може брати участь різна кількість кутів, то доцільно мати значення не тільки окремих кутів, але також у їх сукупній залежності.

Іншим прикладом є цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), які побудовані переважно на основі резистивних сіток. Спрощений варіант такого ЦАП показано на рисунку 3.5. Очевидно, резистори такої сітки окремо не використовують. При відтворенні того чи іншого значення вихідної напруги резистори сітки вмикають у відповідних комбінаціях. Оскільки всі резистори можуть брати участь у

формуванні вихідного сигналу ЦАП, то для розрахунку функції перетворення ЦАП, можливої його нелінійності та інших метрологічних параметрів необхідно мати дійсні значення опорів резисторів.

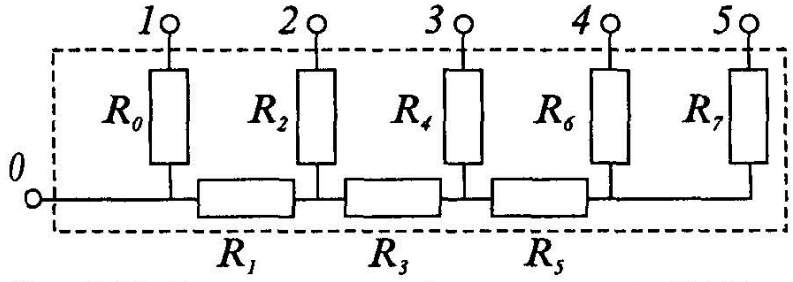


Рисунок 3.5 – До сукупних вимірювань опорів ЦАП

Очевидно, що відповідно до схеми сполучення і наявних виводів мікросхеми, їх неможливо виміряти ні прямо, ні опосередковано. Це можливо здійснити, вимірюючи різні комбінації послідовного сполучення шуканих опорів між різними виводами (сукупну дію різних резисторів), і опрацьовуючи результати таких сукупних вимірювань. Такі ж проблеми можуть виникати у випадку багатоелементних вимірювальних перетворювачів з обмеженим числом виводів.

Калібрування наборів мір, визначення параметрів багатоелементних пристроїв, елементи яких використовують сукупно, здійснюють шляхом виконання сукупних вимірювань. Їх особливістю є те, що за групою результатів вимірювань сукупного впливу різних комбінацій однотипних елементів досліджуваного об’єкта знаходять «найкращі», в певному сенсі, індивідуальні значення параметрів цих елементів.

3.6.2 Складання і розв’язування системи рівнянь сукупних вимірювань

Визначаючи електричний опір заземлення, попарно вимірюють опори трьох заземлень (рис. 3.6): одного основного R_1 (робочого) і двох допоміжних R_2 та R_3:

$$\begin{aligned} R' &= R_1 + R_2; \\ R'' &= R_1 + R_3; \\ R''' &= R_2 + R_3. \end{aligned} \qquad (3.80)$$



Рисунок 3.6 – Вимірювання опорів трьох заземлень

Виконуючи розрахунки, слід здійснити шість вимірювань: двічі виміряти R_1+R_2, двічі R_1+R_3 та двічі R_2+R_3. Оскільки під час кожного вимірювання ймовірні похибки, розв'язання цієї системи можливе лише за правилами обробки результатів сукупних вимірювань.

Складаємо систему умовних рівнянь:

$$\begin{aligned}
a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 - y_1 &= 0;\\
a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 - y_2 &= 0;\\
a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 - y_3 &= 0;\\
a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 - y_4 &= 0;\\
a_{51}x_1 + a_{52}x_2 + a_{53}x_3 - y_5 &= 0;\\
a_{61}x_1 + a_{62}x_2 + a_{63}x_3 - y_6 &= 0,
\end{aligned} \qquad (3.81)$$

де x_1, x_2 і x_3 – опори відповідно R_1, R_2 та R_3;

y_i – результати вимірювань;

коефіцієнти $a_{13} = a_{23} = a_{32} = a_{42} = a_{51} = a_{61} = 0$.

Тоді система умовних рівнянь спрощується:

$$\begin{aligned}
a_{11}x_1 + a_{12}x_2 - y_1 &= 0;\\
a_{21}x_1 + a_{22}x_2 - y_2 &= 0;\\
a_{31}x_1 + a_{33}x_3 - y_3 &= 0;\\
a_{41}x_1 + a_{43}x_3 - y_4 &= 0;\\
a_{52}x_2 + a_{53}x_3 - y_5 &= 0;\\
a_{62}x_2 + a_{63}x_3 - y_6 &= 0.
\end{aligned} \qquad (3.82)$$

У цій системі всі a_{ij}=1.

Система нормальних рівнянь:

$$\begin{cases}
b_{11}x_1 + b_{12}x_2 + b_{13}x_3 = c_1;\\
b_{21}x_1 + b_{22}x_2 + b_{23}x_3 = c_2;\\
b_{31}x_1 + b_{32}x_2 + b_{33}x_3 = c_3.
\end{cases} \qquad (3.83)$$

Коефіцієнти цієї системи обчислюються за такими формулами:

$$b_{11} = \sum_{j=1}^{m} a_{j1}^2 = 4;$$

$$b_{22} = \sum_{j=1}^{m} a_{j2}^2 = 4;$$

$$b_{33} = \sum_{j=1}^{m} a_{j3}^2 = 4;$$

$$b_{12} = b_{21} = \sum_{j=1}^{m} a_{j1} a_{j2} = 2;$$

$$b_{13} = b_{23} = \sum_{j=1}^{m} a_{j1} a_{j3} = 2;$$

$$c_1 = \sum_{j=1}^{m} a_{j1} y_j = y_1 + y_2 + y_3 + y_4;$$

$$c_2 = \sum_{j=1}^{m} a_{j2} y_j = y_1 + y_2 + y_5 + y_6;$$

$$c_3 = \sum_{j=1}^{m} a_{j3} y_j = y_3 + y_4 + y_5 + y_6.$$

Розв'язати систему нормальних рівнянь можна за допомогою визначників. Головний визначник системи:

$$D = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{vmatrix}. \qquad (3.84)$$

Частинні визначники:

$$D_1 = \begin{vmatrix} c_1 & b_{12} & b_{13} \\ c_2 & b_{22} & b_{23} \\ c_3 & b_{32} & b_{33} \end{vmatrix}; \qquad (3.85)$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} b_{11} & c_1 & b_{13} \\ b_{21} & c_2 & b_{23} \\ b_{31} & c_3 & b_{33} \end{vmatrix}; \qquad (3.86)$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & c_1 \\ b_{21} & b_{22} & c_2 \\ b_{31} & b_{32} & c_3 \end{vmatrix}. \qquad (3.87)$$

Звідси найвірогідніші значення результатів вимірювання:

$$\bar{x}_1 = D_1/D; \quad \bar{x}_2 = D_2/D; \quad \bar{x}_3 = D_3/D. \tag{3.88}$$

Для оцінки точності результатів сукупного вимірювання слід обчислити їх середньоквадратичне відхилення; спочатку потрібно підставити добуті значення $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$ та $\bar{x}_3$ в умовні рівняння й знайти кінцеві похибки v_j кожного з цих рівнянь:

$$\begin{aligned} v_1 &= \bar{x}_1 + \bar{x}_2 - y_1; \\ v_2 &= \bar{x}_1 + \bar{x}_2 - y_2; \\ v_3 &= \bar{x}_1 + \bar{x}_3 - y_3; \\ v_4 &= \bar{x}_1 + \bar{x}_3 - y_4; \\ v_5 &= \bar{x}_2 + \bar{x}_3 - y_5; \\ v_6 &= \bar{x}_2 + \bar{x}_3 - y_6. \end{aligned} \tag{3.89}$$

Для даної системи нормальних рівнянь середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{8}\sum_{j=1}^{m} v_j^2}\ . \tag{3.90}$$

Надійні межі випадкових похибок:

$$\varepsilon = t_\gamma S_{\bar{x}}. \tag{3.91}$$

Для цієї системи $(m-n+1=6-3+1=4)$ коефіцієнт надійності $t_\gamma = 3{,}182$, (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Значення t_γ (для сукупних та сумісних вимірювань)

m–n+1	P=0,95	P=0,99
2	12,706	63,657
3	4,303	9,925
4	3,182	5,841
5	2,776	4,604
6	2,571	4,032
7	2,447	3,707
8	2,365	3,499
9	2,306	3,355
10	2,262	3,250

Результати сукупного вимірювання: при P=0,95:

$$R_1 = \overline{x}_1 \pm \varepsilon;$$
$$R_2 = \overline{x}_2 \pm \varepsilon; \qquad (3.92)$$
$$R_3 = \overline{x}_3 \pm \varepsilon.$$

Контрольні питання

1. Які етапи передбачає обробка результатів вимірювань?
2. Основні способи виявлення систематичних похибок.
3. Основні способи виявлення періодичних похибок.
4. Загальні методи коригування систематичних похибок.
5. Суть коригування систематичних похибок вимірювальних приладів введенням поправок.
6. Коригування адитивної систематичної похибки приладу.
7. Основне рівняння прямого разового вимірювання.
8. Основне рівняння (модель) похибки прямого разового вимірювання.
9. Основні етапи обробки результатів вимірювань з багаторазовими спостереженнями.
10. Що є результатом опосередкованого вимірювання?
11. Основні етапи обробки результатів опосередкованих вимірювань.
12. Основні етапи обробки результатів сумісних вимірювань.
13. Основні етапи обробки результатів сукупних вимірювань.

ТЕМА 4
ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ТА ЇЇ ФУНКЦІОНАЛЬНІ СКЛАДОВІ

План

4.1 Різновиди засобів вимірювальної техніки.
4.2 Аналогові і цифрові прилади.
4.3 Вимірювальний канал.
4.4 Вимірювальні системи.
4.5 Вимірювальна установка.
4.6 Вимірювальні пристрої.

4.1 Різновиди засобів вимірювальної техніки

Вимірювання здійснюють із застосуванням призначених для цього спеціальних технічних засобів – засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). Ці засоби взаємодіють з об’єктом, внаслідок чого на їх входах отримують сигнали, які містять інформацію про вимірювану величину. Згідно із ДСТУ 2681-94 до ЗВТ (рис. 4.1) належать засоби вимірювань (ЗВ) та вимірювальні пристрої (ВП). Особливістю засобів вимірювань є те, що з їх допомогою безпосередньо одержують результат вимірювання. До ЗВ належать вимірювальні прилади, вимірювальні канали, вимірювальні системи та вимірювальні уставки. Вимірювальні пристрої (міри, вимірювальні перетворювачі, компаратори та обчислювальні компоненти) виконують лише одну з вимірювальних операцій і самостійно не забезпечують одержання результату вимірювання, а лише в сукупності з іншими пристроями чи засобами вимірювань.

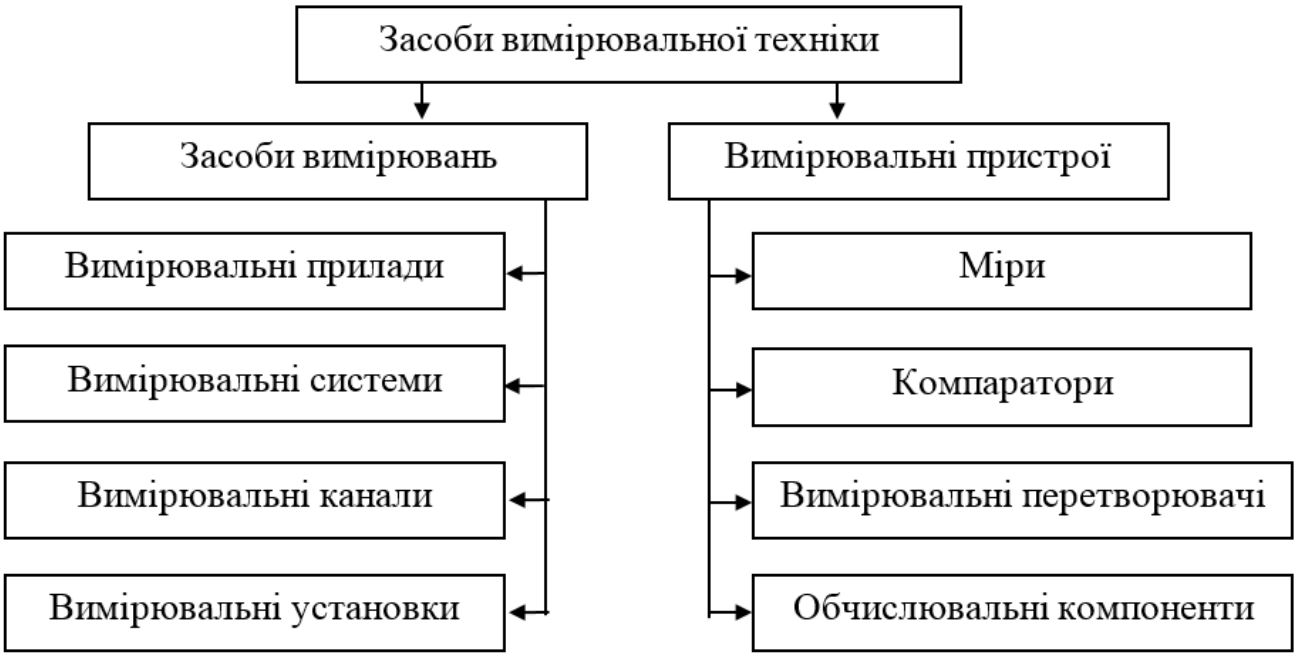


Рисунок 4.1 – Класифікація засобів вимірювальної техніки

Як вимірювальні прилади, так і вимірювальні перетворювачі класифікують за методом вимірювання на пристрої прямої дії та порівняння, а за способом представлення величин на аналогові та цифрові. За способом представлення показів вимірювальні прилади поділяють на показуючі, реєструючі, самопишучі та друкуючі. Крім того, прийнято розрізняти вимірювальні перетворювачі в залежності від розташування у вимірювальному ланцюгу, а саме первинні, вторинні, проміжні, порогові та передавальні.

За ступенем захисту вимірювальні пристрої поділяються на виконані в нормальному (звичайному), пило-, водо-, вибухозахищеному, герметичному та іншому виконанні.

За характером застосування вимірювальні прилади поділяють на стаціонарні (щитові), корпус яких пристосований для жорсткого кріплення на місці експлуатації, та переносні, корпус яких не призначений для закріплення.

Крім розглянутої класифікації суттєвим є поділ засобів вимірювання за принципом дії, тобто, залежно від фізичного принципу, який покладений в основу його побудови. Принцип дії знаходить відображення, як правило, в назві засобу вимірювання, наприклад: термоелектричний термометр, деформаційний манометр, електромагнітний витратомір та інше.

І нарешті, суттєвою з позиції метрології є класифікація згідно з метрологічним призначенням, відповідно до якої розрізняють зразкові та робочі засоби вимірювань.

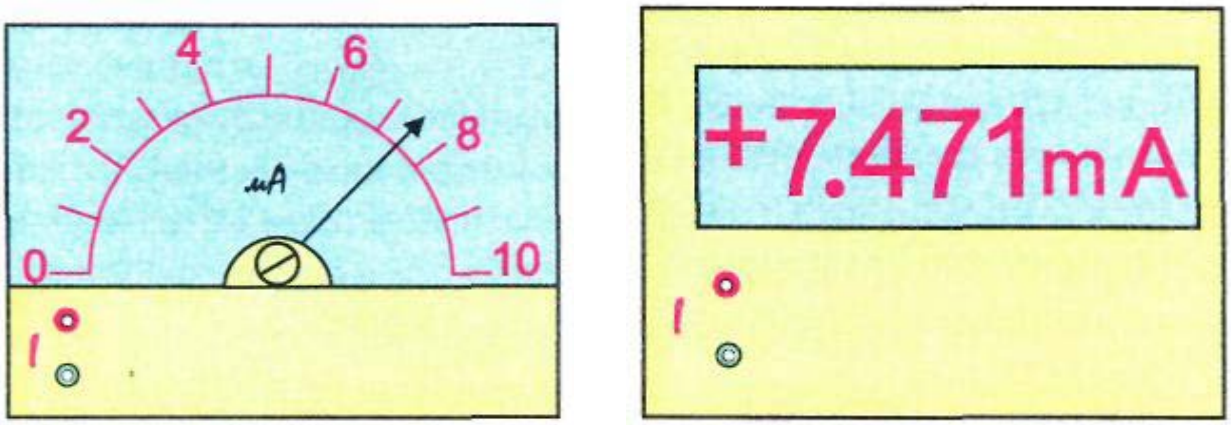
Робочий засіб вимірювання – засіб, який застосовується для вимірювань, не пов’язаних з передачею розміру одиниць. Робочі засоби вимірювань – це вся сукупність вимірювальних приладів, перетворювачів, установок та систем, яка застосовується в усіх галузях діяльності людини безпосередньо на виробництві для визначення технологічних параметрів.

Зразковий засіб вимірювання – міра, вимірювальний прилад або перетворювач, які призначені для повірки за допомогою їх інших засобів вимірювань.

4.2 Аналогові і цифрові прилади

З погляду користувача (експериментатора) аналогові і цифрові прилади відрізняються способом отримання результату вимірювання. В аналогових приладах значення вимірюваної величини, зазвичай, перетворюється в кутове чи лінійне переміщення покажчика (стрілки чи світлової плямки) (рис. 4.2, а). Таке переміщення є механічним аналогом розміру вимірюваної величини. Числове значення величини одержується безпосередньо за участю експериментатора, який здійснює відлік за шкалою приладу.

Наприклад, для рисунка 4.2, (а) виміряне значення струму становить I = 7,5 мА. У цифрових приладах (рис. 4.2, б) значення величини отримується автоматично, відразу у вигляді числового значення з відповідною одиницею. Експериментатор безпосередньо не бере участі у формуванні відліку. Наприклад, для рисунка 4.2, (б) виміряне значення струму становить I=7,471 мА.



а) б)

Рисунок 4.2 – Аналоговий (а) та цифровий (б) прилади

Аналогові прилади бувають електромеханічними (рис. 4.3, а) та електронними (рис. 4.3, б). Електромеханічний прилад (рис. 4.3, а) складається з вимірювального механізму та відлікового пристрою. У механізмі приладу електрична величина (струм чи напруга) перетворюється в механічне переміщення (кутове чи лінійне) рухомої частини механізму. Відліковий пристрій містить шкалу з поділками та покажчик (механічний – стрілка чи світловий – плямка). Для вимірювання інших величин (опір, потужність тощо), а також для зміни границь вимірювань вимірювальний механізм вмикається відповідно у вимірювальну схему приладу.

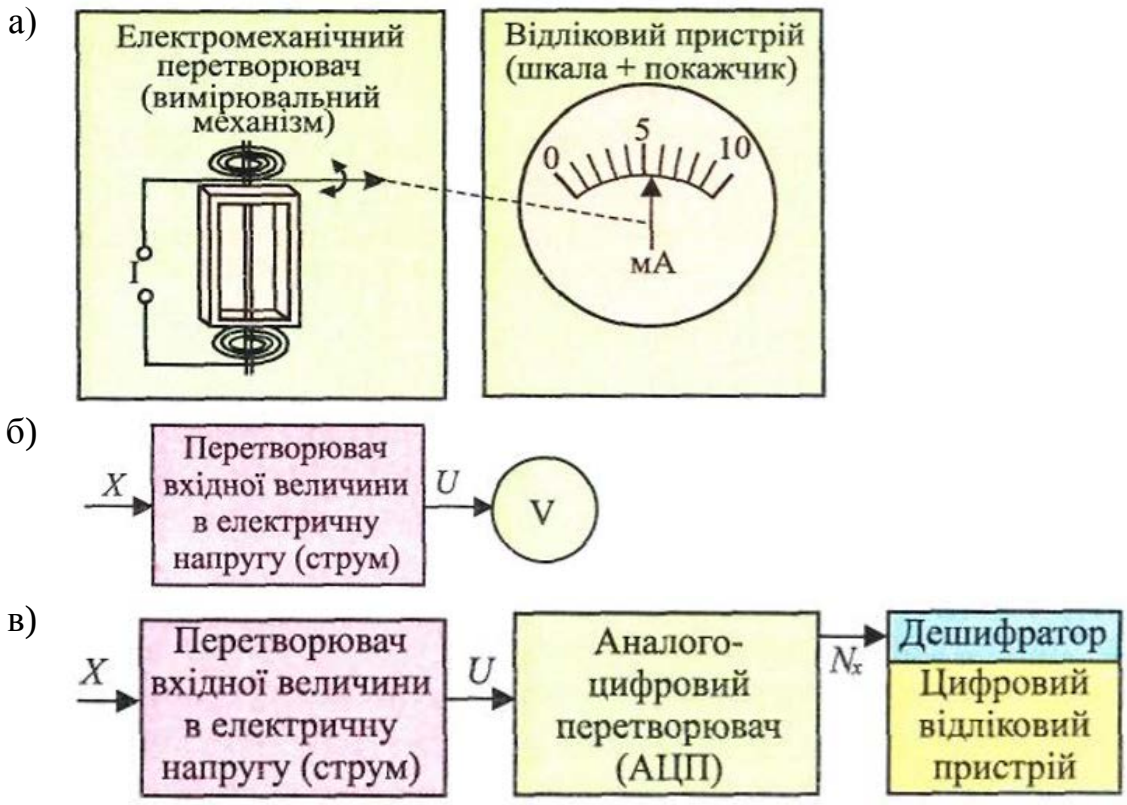


Рисунок 4.3 – Структурні схеми електромеханічного (а) електронного аналогового (б) та цифрового (в) приладів

Електронний аналоговий прилад (рис. 4.3, б) складається з вхідного електронного перетворювача вимірюваної величини у вихідну напругу, яка вимірюється електромеханічним вольтметром. Вихідною величиною може бути струм, тоді на виході приладу використовується міліамперметр.

Структура цифрового приладу (рис. 4.3, в) у вхідній частині подібна до структури електронного аналогового приладу. Обов'язковим елементом кожного цифрового вимірювального приладу є аналого-цифровий перетворювач (АЦП) – вимірювальний пристрій, що здійснює автоматичне перетворення розміру вихідної величини (переважно напруги) вхідного перетворювача у її цифрове (числове) значення. Таке перетворення називають аналого-цифровим перетворенням.

На виході цифрового приладу використовується цифровий відліковий пристрій, за допомогою якого через дешифратор результат вимірювання подається у вигляді цифр та інших знаків.

Існує широкий спектр вимірювальних приладів, які відрізняються між собою за видом і родом вимірюваних величин, за діапазонами та характеристиками точності їх вимірювань та іншими характеристиками. На промислових об'єктах переважно використовують стаціонарні (щитові) прилади (аналогові та цифрові) для вимірювань однієї величини в одному, сталому діапазоні. Наприклад, вольтметр для вимірювання напруги мережі живлення, термометр для вимірювання температури у технологічній печі тощо. У технічних та лабораторних вимірюваннях широко застосовуються прилади, які можуть вимірювати декілька величин у різних діапазонах. Такі прилади називають мультиметрами, вони здебільшого призначені для вимірювань у різних діапазонах електричних величин: постійних та змінних струму та напруги, електричного опору, частоти і періоду змінних сигналів тощо. Існують мультиметри, які забезпечують вимірювання також і неелектричних величин, зокрема, температури при використанні вимірювальних перетворювачів (термоелектричних, резистивних та термісторів) зі стандартними функціями перетворення.

4.3 Вимірювальний канал

Вимірювальний канал – це сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів зв'язку та інших пристроїв, призначена для отримання вимірювальної інформації про одну вимірювальну величину. Переважно вимірювальний канал складається з декількох блоків, серед яких найважливішими є (рис. 4.4):

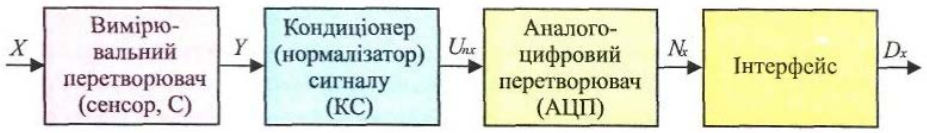


Рисунок 4.4 – Вимірювальний канал

– вимірювальний перетворювач (сенсор, С), який сприймає вимірювану величину і перетворює її у вихідну, придатну для подальшого перетворення і пересилання;

– кондиціонер (нормалізатор) сигналу (КС), в якому відбувається низка вимірювальних операцій над вихідним сигналом сенсора для доведення цього сигналу (переважно електричної напруги) до рівня, придатного до подальшого аналого-цифрового перетворення;

– аналого-цифровий перетворювач (АЦП), що здійснює автоматичне перетворення розміру аналогового сигналу (переважно, електричної напруги) у її цифрове(числове)значення;

– інтерфейс (І) – це група технічних пристроїв (перетворювачів кодів, формувачів і модуляторів сигналів, з'єднувачів, кабелів тощо) і відповідних програм керування, які призначені для пересилання вимірювальної інформації між ЗВТ, обчислювальними, відліковими та реєструвальними пристроями.

На рисунку 4.4 використано позначення: X – вимірювана величина; Y – вихідна величина сенсора; U_m – нормалізований рівень сигналу, придатний для подальшого аналого-цифрового перетворення; N_x – результат аналого-цифрового перетворення; D_x – цифрові дані, що пересилаються з виходу АЦП для подальшого опрацювання, зберігання чи (і) реєстрації.

Оскільки аналого-цифрові перетворювачі зазвичай виготовляються на задані рівні вхідних сигналів (переважно вхідною величиною АЦП є напруга у заданому діапазоні, наприклад, однополярна в діапазонах $0–1B$; $0–2B$; $0–5B$; $0–10B$ чи інші або у двох полярних діапазонах), тому незалежно від роду і виду вихідного сигналу вимірювального перетворювача (сенсора) на виході КС мусить бути сформований сигнал із заданими властивостями, найголовніша з яких – це заданий діапазон її зміни. Тому цей елемент вимірювального каналу називають нормалізуючим перетворювачем, чи перетворювачем з уніфікованим вихідним сигналом, а останнім часом в зарубіжній літературі з вимірювальної техніки такі пристрої називають кондиціонерами сигналів. Відповідні вимірювальні операції називаються кондиціонуванням вимірювального сигналу. Дослівно англійський термін conditioning означає «покращувати стан», а термін conditioned – відповідний нормі чи стандарту. Тобто, кондиціонований сигнал – це сигнал, що відповідає встановленим нормам.

Набір перетворень сигналів у кожному конкретному випадку залежить від роду, виду та інших властивостей вимірювальної величини. Наприклад, цими операціями можуть бути перетворення вихідної величини сенсора в електричні напругу чи струм, підсилення (сигнал замалий) чи послаблення (сигнал завеликий) сигналу, зміщення його початкового рівня (ненульовий вихідний сигнал сенсора за нульового значення величини), аналогове фільтрування (сигнал з перетворювача спотворений завадами та шумами), перетворення роду величини (при вимірюваннях характеристик змінних сигналів – середньоквадратичного, середньовипрямленого, амплітудного значень) тощо.

4.4 Вимірювальні системи

Вимірювальні системи – це сукупність вимірювальних каналів, інших засобів вимірювальної техніки і зв'язку, обчислювальних та інших технічних пристроїв, а також керуючих та обчислювальних програм, об'єднаних для

отримання вимірювальної інформації про стан досліджуваного об’єкта загалом. Вимірювальні системи призначені для вимірювання не однієї величини, а сукупності величин, які характеризують стан об’єкта. Ці величини можуть бути як одного виду, так і різних видів, що характеризують різні властивості об’єкта.

Наприклад, для вимірювання температури у різних просторових точках об’єкта (температурного поля у топці котлоагрегату) використовують багатоканальну вимірювальну систему, що має однотипні елементи. Для дослідження параметрів двигуна внутрішнього згоряння застосовують вимірювальну систему з різними вхідними величинами: температура та тиск газів у циліндрі, напруга запалювання, швидкість обертів, витрата палива, потужність тощо.

Узагальнена функціональна схема вимірювальної системи наведена на рисунку 4.5. На досліджуваному об’єкті встановлюються необхідні вимірювальні перетворювачі, які створюють сигнали про значення параметрів. Вихідні сигнали сенсорів за допомогою пристроїв перетворюються у цифрові дані, які пересилаються до пристроїв обробки, де відбувається їх необхідне опрацювання.

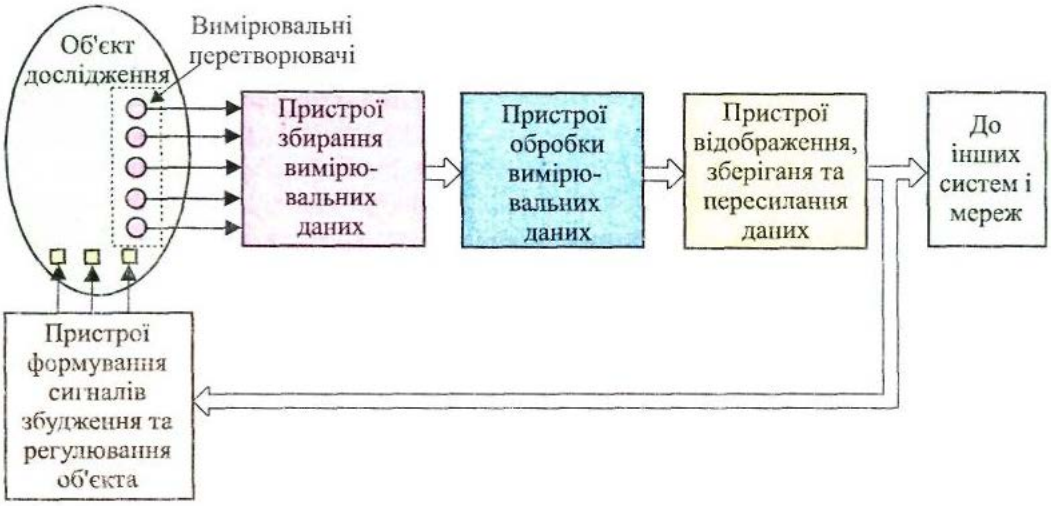


Рисунок 4.5 – Функціональні пристрої вимірювальної системи

Етап опрацювання вимірювальних даних включає широкий спектр математичних, зокрема логічних операцій, серед яких: розв’язування обернених вимірювальних задач для знаходження значень параметрів об’єкта за результатами вимірювань вихідних сигналів перетворювачів, цифрове згладжування, фільтрація та усереднення сигналів, їх статистичне опрацювання для визначення числових характеристик, лінеаризація функцій перетворення сенсорів та вимірювальних каналів загалом, корекція статичних та динамічних похибок, порівняння результатів вимірювань контрольованих параметрів об’єкта з їх заданими допусками і формування відповідних сигналів, формування сигналів збудження об’єкта під час його діагностики тощо.

Ці функції виконують обчислювальні засоби різної продуктивності, від найпростіших до надскладних. Як обчислювальні засоби у вимірювальних системах можуть використовуватися мікроконтролери, мікропроцесори, одноплатні та однокристальні ЕОМ, персональні комп’ютери широкого

застосування, мультипроцесорні обчислювальні системи, спеціалізовані процесори тощо. Аналогічно програмне забезпечення вимірювальних систем також може бути різної складності, бути універсальним чи спеціалізованим.

Пристрої відображення, зберігання та пересилання (транспорту) даних забезпечують комунікацію вимірювальної системи з персоналом та системами інших ієрархічних рівнів, документування та архівування результатів вимірювань, візуалізацію результатів контролю та діагностики об’єкта. Відображення результатів може відбуватися як у цифровій, так і в аналоговій формах, за допомогою типових цифрових та аналогових відлікових пристроїв та табло, а також віртуальним способом на екранах моніторів.

Для діагностування стану об’єкта необхідно здійснювати його збудження зовнішніми впливами і далі вимірювати реакцію об’єкта на ці збудження. Для цього служать пристрої формування сигналів збудження, в яких відбуваються зворотні операції: цифрові дані – цифроаналогове перетворення – аналогове згладжування (фільтрація) – підсилення – зворотне перетворення електричного сигналу у вихідну неелектричну величину.

Об’єкт дослідження може бути просторово зосередженим або розпорошеним, може характеризуватися однотипними або різнотипними параметрами, тому збирання вимірювальних даних може здійснюватися зосередженим чи розподіленим способом на основі використання відповідних вимірювальних каналів, пересилання та комутації потоків даних. Важливими елементами вимірювальних систем є їх інтерфейсні компоненти, які забезпечують різні види узгоджень між складовими системи: конструктивні, інформаційні, сигналові та програмні.

Залежно від призначення вимірювальних систем розрізняють інформаційно-вимірювальні, контрольно-вимірювальні та діагностично-вимірювальні системи (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 – Класифікація вимірювальних систем

Завданням інформаційно-вимірювальної системи є визначення розмірів вимірюваних величин – параметрів досліджуваного об’єкта, тобто, кількісного оцінювання процесів, що відбуваються в об’єкті. Такі системи переважно використовують у наукових дослідженнях.

Якщо необхідно встановити, чи параметр (параметри) об’єкта в нормі, чи ні, то виникає потреба реалізації формування нижнього та верхнього допустимих

рівнів для кожного з параметрів об’єкта, порівняння результатів вимірювань з цими рівнями і формування відповідного результату контролю. Такі функції виконують контрольно-вимірювальні системи. Отже, контрольно-вимірювальна система, крім кількісного оцінювання параметрів стану об’єкта, дає також якісну його характеристику: чи об’єкт (його параметри) в нормі, чи ні.

Якщо ж один чи декілька параметрів, що характеризують стан об’єкта, виходять за межі допуску, то виникає проблема встановлення причини такого стану. Відповідь на це питання дає діагностично-вимірювальна система. У такій системі результати діагностики отримують за допомогою відповідного збудження об’єкта і вимірювання та опрацювання його реакцій на ці збудження.

4.5 Вимірювальна установка

Вимірювальна установка – це сукупність функціонально об’єднаних вимірювальних приладів і пристроїв та інших технічних засобів, призначених для досліджень властивостей зразків матеріалів та метрологічної перевірки інших засобів вимірювальної техніки. Об’єктом досліджень у такому разі є засоби вимірювальної техніки (прилади, канали систем, сенсори та інші вимірювальні перетворювачі, міри тощо). Конструктивно уставка виконана переважно як одне ціле у вигляді стенда з необхідними пристроями під’єднання досліджуваних зразків, регулювання величин, відображення і документування результатів. Операції з досліджень матеріалів та метрологічної перевірки можуть здійснюватися вручну або з різним ступенем автоматизації, аж до повної. Тенденція розвитку ЗВТ є такою, що у перспективі функції установок переберуть на себе контрольно-вимірювальні системи.

4.6 Вимірювальні пристрої

Вимірювальний пристрій – ЗВТ, в якому виконується лише одна із складових частин процедури вимірювання (вимірювальна операція). Вимірювальні пристрої самостійно не забезпечують можливості отримувати результат вимірювання.

До вимірювальних пристроїв належать міри, вимірювальні перетворювачі, масштабні перетворювачі, компаратори та обчислювальні компоненти.

До них можна зарахувати також індикатори, гальванометри, нуль-органи (покажчики нуля), та інші пристрої відображення значень величин.

Міра – вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення і (або) збереження фізичної величини заданого значення.

Розрізняють однозначні та багатозначні міри (магазини). Однозначні міри відтворюють одне значення фізичної величини. Наприклад, однозначні міри опору відтворюють значення опорів $R_N = 10^n$ Ом (де n – ціле число від – 5 до 9). Міра електрорушійної сили – нормальний елемент, який відтворює певне значення ЕРС.

Набір однозначних мір утворює багатозначну міру, наприклад, магазин опору.

Вимірювальний перетворювач (ВП) – вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення.

До вимірювальних перетворювачів, зокрема, належать масштабні ВП та ВП неелектричних величин.

Масштабний ВП здійснює масштабне перетворення фізичної величини без зміни роду. Наприклад, подільник напруги, підсилювач напруги, вимірювальні трансформатори, вимірювальний шунт тощо.

ВП неелектричних величин (сенсори) – це перетворювачі роду фізичної величини, вони перетворюють неелектричну величину, наприклад, температуру, в електричний сигнал (термоелектричний перетворювач). Тензорезистор перетворює механічну деформацію у зміну електричного опору.

Компаратори – це вимірювальні пристрої, за допомогою яких порівнюють вимірювану та відтворену мірою величини. Прикладом компаратора є терези для знаходження маси тіла його зрівноважуванням гирями відомої маси. Часто компаратор може бути сконструйованим разом з однозначною чи багатозначною мірою (для зрівноважування величин), а також масштабним перетворювачем та іншими пристроями, наприклад, нуль-індикатором, за яким встановлюють факт порівняння величин. У такий спосіб побудовані компаратори електричних опорів – мости постійного і змінного струмів, компаратори електричної напруги тощо.

Обчислювальні компоненти – це пристрої, за допомогою яких здійснюють необхідні обчислювальні процедури над первинними результатами вимірювань для отримання остаточних результатів. Залежно від обсягу та складності виконуваних операцій ці компоненти можуть бути різної складності – від найпростіших мікропроцесорів, універсальних комп'ютерів аж до найскладніших спеціалізованих процесорів сигналів та мультипроцесорних систем. Важливим елементом обчислювального компонента є його програмне забезпечення, а з метрологічного погляду – програма (чи програми) опрацювання результатів вимірювань.

Контрольні питання

1. Що таке засоби вимірювальної техніки?
2. Що таке засоби вимірювань? Навести приклади.
3. Що таке вимірювальні пристрої? Навести приклади.
4. Що таке вимірювальні прилади? Навести приклади.
5. Що таке вимірювальний канал?
6. Назвати основні складові вимірювального каналу.
7. Що таке вимірювальна система?
8. Перерахувати основні функціональні компоненти вимірювальної системи.
9. Назвати різновиди вимірювальних систем.
10. Що таке вимірювальна установка?
11. Що таке вимірювальна міра?
12. Що таке вимірювальний перетворювач?
13. Що таке компаратор?
14. Що таке обчислювальний компонент?

ТЕМА 5
МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ

План

5.1 Повірка та калібрування засобів вимірювання.
5.2 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання температури.
5.3 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання тиску та витрат.
5.4 Випробувальні установки для повірки лічильників кількості рідин.

5.1 Повірка та калібрування засобів вимірювання

Для багатьох практичних та технологічних вимірювань однозначність вимірювань забезпечується однозначністю засобів вимірювань. Під однозначністю засобів вимірювань приймається такий стан вимірювань, коли вони проградуйовані в узаконених одиницях, а їх метрологічні властивості відповідають нормі. Однозначність засобів вимірювань забезпечується шляхом їх повірки.

Повірочна схема – затверджений документ, що встановлює засоби, методи та точність передачі розміру одиниць від еталона або вихідного зразкового засобу до робочих засобів вимірювання (рис. 5.1).

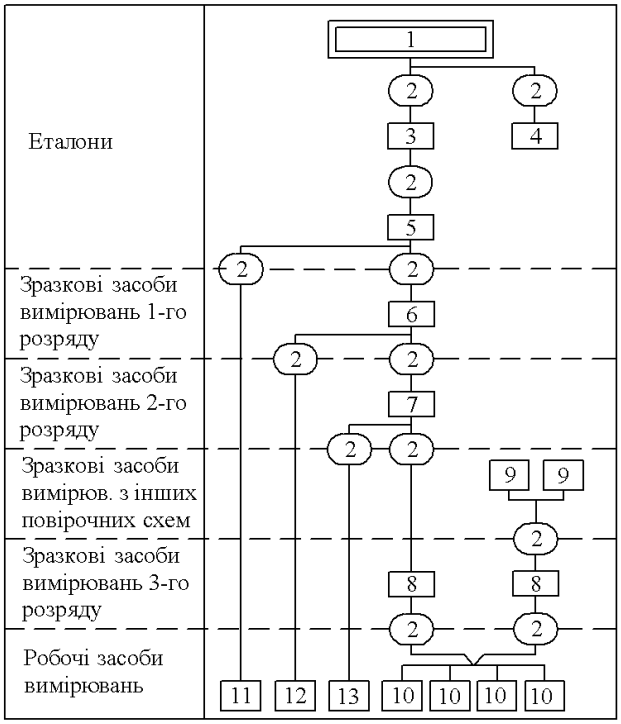


Рисунок 5.1 – Структура повірочної схеми: 1 – державний еталон; 2 – метод передачі розмірів; 3 – еталон – копія; 4 – еталон – свідок; 5 – робочий еталон; 6 – 9 – зразкові засоби вимірювання; 10 – робочі засоби вимірювання; 11 – робочі засоби вимірювання найвищої точності; 12 – робочі засоби вимірювання підвищеної точності; 13 – робочі засоби вимірювання високої точності

Калібрування робочих засобів вимірювання виконується шляхом порівняння їх показів з показами зразкових засобів. Калібрування передбачає регулювання засобів вимірювання – виконання ряду операцій, метою яких є зменшення основної похибки до гранично допустимого значення шляхом зменшення систематичної складової похибки.

Калібрування, як правило, виконується в умовах експлуатації і може застосовуватись як для приладів, так і вимірювальних систем. Після калібрування може бути введена поправка до показів вимірювального приладу.

5.2 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання температури

Основу метрологічного забезпечення засобів вимірювання температури в діапазоні 13,8-6300 К складають дві повірочні схеми, в основу яких покладено державні первинні еталони одиниць температури – кельвін (К). Принцип дії еталонів оснований на відтворенні реперних точок МПТШ-68. У діапазоні температур від 13,81 до 273,15 К передача розміру одиниці від еталону здійснюється зразковими засобами вимірювань, до складу яких входять платинові термоперетворювачі опору, напівпровідникові термоперетворювачі опору, мідь-копелеві та мідь-костантанові термоелектричні термометри та ртутні скляні термометри.

Передача розміру одиниць температури від еталона в діапазоні 273,15-6300 К здійснюється зразковими засобами вимірювань, які згідно з повірочною схемою поділяються на дві групи: термометри та пірометри. У групу термометрів входять: ртутні скляні термометри, платинові термометри опору, платинородій-платинові і платинородій-платинородієві (гр. ПР30/6) ТЕТ та вольфрам-ренієві (гр.ВР5/20) ТЕТ, а в групу пірометрів – температурні лампи, пірометри повного випромінювання та візуальні монохроматичні пірометри.

Зразкові скляні рідинні термометри призначені для вимірювання температур в діапазоні 240,15-903 К. Зразкові ртутні термометри бувають палочні та з вкладеною шкалою.

Палочні – це капіляр з зовнішнім діаметром 6-8 мм та внутрішнім – 0,1 мм. Шкала нанесена безпосередньо на зовнішню поверхню. Зразкові ртутні термометри випускаються з ціною поділки 0,01; 0,02; 0,05; 0,1°С.

Зразкові термоперетворювачі опору виготовляються з платини. Для вимірювання опору чутливого елемента передбачено дві пари виводів. Одна пара виводів потенціальна, друга – струмова. Потенціальні виводи підключаються до вимірювального приладу, а струмові – до джерела струму. Зразкові термометри з абсолютною похибкою ±(0,03-0,07) К в діапазоні 273-903 К застосовують для повірки робочих термометрів.

Зразкові термоелектричні термометри (ТЕТ) поділяють на платинородій-платинові, платинородієві та вольфрамренієві. Конструкція робочих та зразкових ТЕТ аналогічні.

Зразкові температурні лампи призначаються для відтворення температур за яскравістю та кольором. Температурні лампи з абсолютною похибкою ±(3-15) К призначені для повірки робочих монохроматичних пірометрів та пірометрів

спектрального відношення в інтервалі температур 1100-3100 К.

Зразкові пірометри повного випромінювання призначені для повірки робочих пірометрів в діапазоні температур 300-2800 К. Абсолютна похибка складає ±(5-15) К.

Як зразкові міри електрорушійної сили використовуються нормальні елементи (НЕ) – високоточні гальванічні елементи. НЕ бувають двох типів – насичені та ненасичені.

Насичений елемент (рис. 5.2) складається з герметичної скляної ємкості Н-подібної форми. Позитивним електродом 1 служить ртуть, негативним 5 – амальгама кадмію.

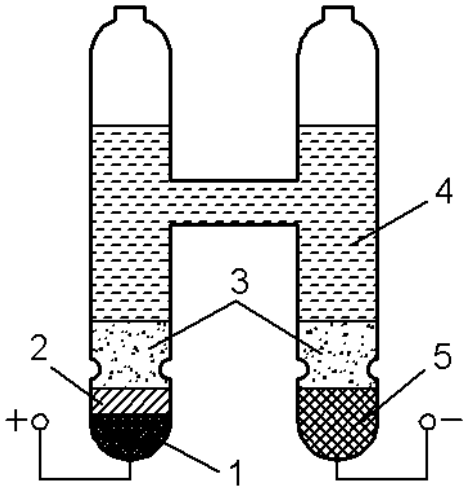


Рисунок 5.2 – Будова нормального елемента

Виводи з електродів, виконаних з платини, впаяні в нижні кінці ємкості. Над ртуттю нанесено шар пасти 2 із суміші сірчанокислої ртуті та сірчанокислого кадмію. Паста є деполяризатором. Електролітом 4 служить насичений розчин сірчанокислого кадмію. Насичення розчину забезпечується кристалами сірчанокислого кадмію 3. В залежності від допустимої зміни е.р.с. в процентах за рік НЕ поділяються на класи 0,0002; 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005. Насичений НЕ дозволяє пропускати струм не більше 1 мкА.

Ненасичені НЕ відрізняються тим, що вони заповнені ненасиченим розчином сірчанокислого кадмію.

Зразкові потенціометри постійного струму – це переносні потенціометри класу 0,05. Ці потенціометри призначені для безпосереднього вимірювання е.р.с.; повірки технічних ТЕТ, нормуючих вимірювальних перетворювачів та приладів, що працюють з ними в комплекті; отримання напруги постійного струму, яку можна плавно регулювати.

Електрична схема потенціометра з ручним врівноваженням (рис. 5.3) складається з трьох контурів: контролю I, компенсації II та вимірювання III. Контур контролю I включає нормальний елемент НЕ, резистор R_{HE}, тумблер T в положенні K (контроль) та нуль-гальванометр *НГ*.

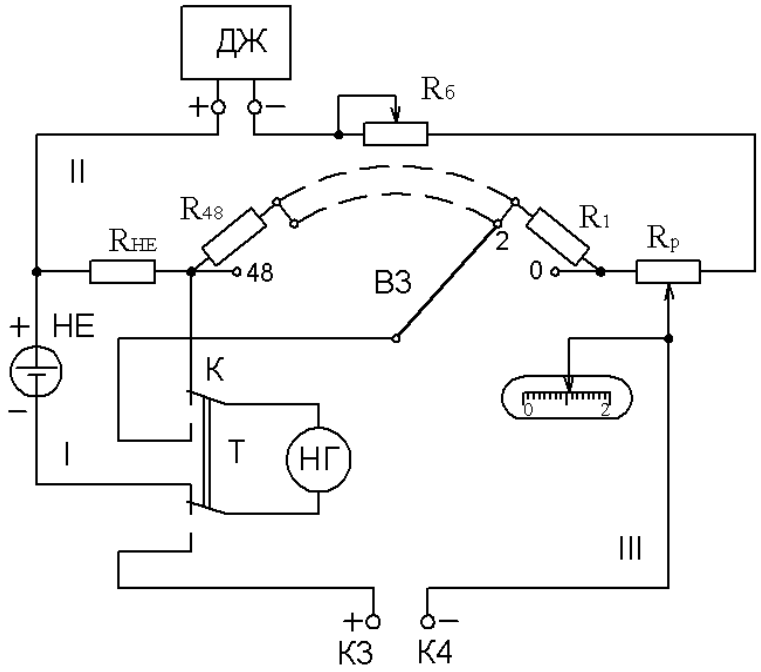


Рисунок 5.3 – Схема потенціометра з ручним врівноваженням

Контур компенсації II утворений змінним резистором $R_б$, джерелом живлення ДЖ, резистором $R_{НЕ}$, резисторами $R_1 – R_{48}$ секціонованого перемикача *ВЗ* і реохордом $R_р$. Контур вимірювання III складається з затискачів *КЗ* і *К4*, на які подається е.р.с, що вимірюється, резисторів $R_1 – R_{48}$ секціонованого перемикача *ВЗ*, тумблера *Т* в положенні *И* (вимірювання) та нуль-гальванометра *НГ*.

Як зразкові міри електричного опору застосовуються електричні котушки опору і магазини опорів класів точності 0,01-0,05. Вони широко використовуються для повірки логометрів, автоматичних електронних мостів та нормуючих перетворювачів, які працюють в комплекті з термометрами опору.

5.3 Метрологічне забезпечення засобів вимірювання тиску та витрат

Основу метрологічного забезпечення засобів вимірювання тиску складає група державних еталонів, до складу якої входять один первинний та п’ять спеціальних еталонів.

Державний первинний еталон одиниці тиску – це комплекс засобів вимірювання, що включає групу з п’яти поршневих приладів змінного складу, набору гир та спеціальну апаратуру для створення і підтримання гідростатичного тиску, який створюється вагою поршня та гир, що його навантажують.

У якості зразкових засобів вимірювання тиску використовуються рідинні компенсаційні, вантажопоршневі та деформаційні прилади.

До рідинних компенсаційних приладів відноситься універсальний рідинний мановакуумметр (прилад Петрова).

Прилад такого типу призначений для повірки дифманометрів-витратомірів змінного перепаду тиску, вакуумметрів, тягомірів та інших засобів вимірювання тиску й розрідження. Прилад включає дві пари сполучених посудин. Одна з них

призначена для роботи на «воді», інша – на «ртуті».

Відносна похибка показів універсального рідинного вакуумметра для вимірювання тиску й розрідження в діапазоні 150-1000 мм вод. ст. і в діапазоні 75 – 1000 мм рт. ст. складає ±0,3%. В діапазоні 0-150 мм вод. ст. абсолютна похибка не перевищує ±0,5 мм. вод. ст, а для ртуті в діапазоні тисків 0-75 мм рт. ст. – 0,25 мм. рт. ст. На даний час прилад Петрова має обмежене використання.

Принцип дії вантажопоршневих засобів вимірювання тиску оснований на врівноваженні зусилля, що створюється тиском, який вимірюється, на неущільненому поршні, силою ваги вантажу, що навантажує поршень. Неущільнений поршень – це поршень правильної циліндричної форми, поміщений у циліндр. Між стінками циліндра й поршня забезпечено рівномірний дуже незначний проміжок (1-5 мкм), заповнений робочою рідиною – трансформаторним або касторовим мастилом. У результаті поршень знаходиться у підвішеному стані і може проявляти на рідину тиск, зумовлений вагою поршня та вантажу, поміщеного на нього.

На рисунку 5.4 показано схему установки з вантажопоршневим манометром, оснащеним простим поршнем. Установка включає вантажопоршневий манометр I та гідравлічний прес II. Вантажопоршневий манометр – це ємкість циліндричної форми 1, заповнена робочою рідиною. У внутрішній порожнині циліндра розташовано поршень 2 з вантажоутримуючою тарілкою 6.

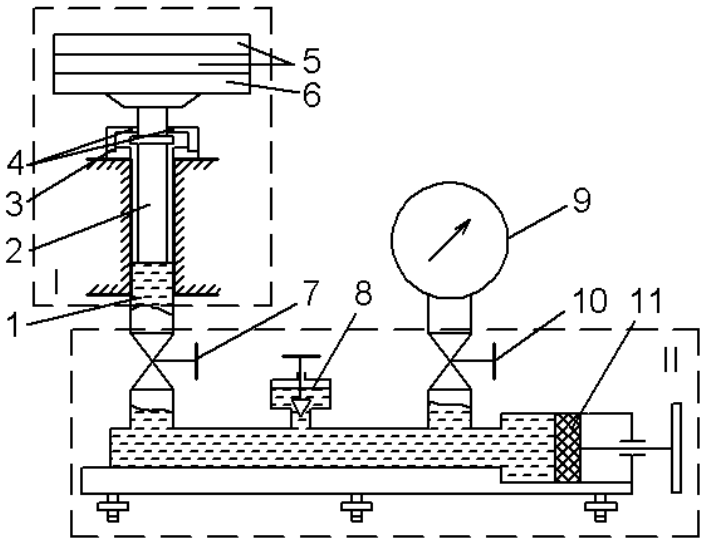


Рисунок 5.4 – Схема вантажопоршневого манометра

Гідропрес складається з поршня 11, що має манжетне ущільнення. Внутрішня порожнина преса з’єднується з вантажопоршневим манометром I і приладом 9, який повіряється, через канали, що перекриваються вентилями 7 і 10. Для заповнення гідравлічної системи робочою рідиною передбачено бачок 8 з запірним вентилем.

Під час вимірювання тиску P, що створюється гідропресом, вантажоутримуючу тарілку навантажують вантажами 5 до того моменту, доки поршень 2 не прийде в стан рівноваги. Про досягнення рівноваги судять по

співпадінні рисок 4 на поршні і обмежувачі ходу 3 поршня. В стані рівноваги поршня буде справедливою рівність:

$$P = \frac{m_p + m_в}{F_{пр}}(1 - \rho_п \rho_в)g, \qquad (5.1)$$

де m_p, $m_в$ – маса поршня та вантажів;

$\rho_п$, $\rho_в$ – густина повітря і матеріалу вантажів;

$F_{пр}$ – приведена площа поршня.

На практиці $F_{пр}$ визначається експериментально і є основним метрологічним параметром вантажопоршневих манометрів. В сучасних манометрах приведена площа поршня – 0,5 см^2. Класи точності вантажопоршневих манометрів з простим поршнем – 0,02; 0,05; 0,2.

Принцип дії зразкових деформаційних манометрів і вакуумметрів аналогічний робочим манометрам і вакуумметрам. Відмінним елементом конструкції є коректор нуля та аретир. Шкала приладів кругова і має 100 або 250 умовних одиниць. Основною особливістю зразкового приладу є матеріал, з якого виготовлено пружний чутливий елемент.

Верхня межа вимірювання зразкових манометрів надлишкового тиску обмежені значеннями 0,1-60 МПа. Діапазон вимірювання зразкових вакуумметрів – 0,1-60 МПа. Класи точності зразкових деформаційних приладів 0,15; 0,2; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0.

Відтворення одиниць витрат газів та рідин здійснюється групою державних еталонів, в основу роботи яких покладено вимірювання об’єму або маси газу чи рідини за визначений проміжок часу. Передача розміру одиниці від еталонів до робочих засобів вимірювання витрат здійснюється зразковими засобами, до складу яких входять витратомірні установки та зразкові витратоміри.

У динамічні витратомірній установці (рис. 5.5) робоча рідина насосом 1 закачується у напірний бак 4, у якому компресором 2 створюється певний статичний тиск, що контролюється манометром 3.

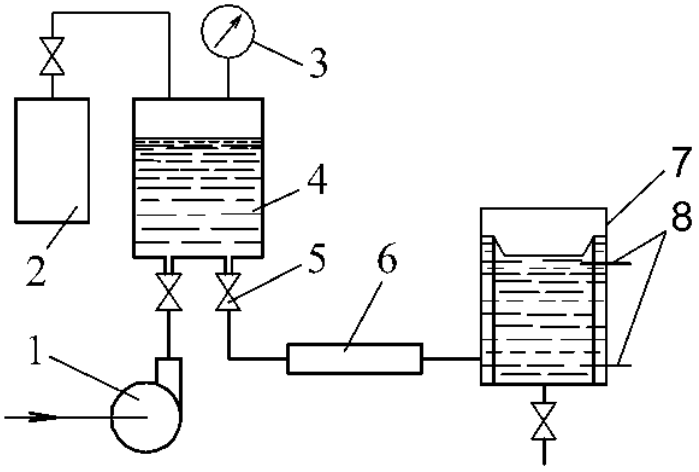


Рисунок 5.5 – Схема динамічної витратомірної установки

Під час повірки робоча рідина витискається із напірного бака через відкритий вентиль 5 та випробувальну ділянку 6, вихід якої під'єднано до мірної ємкості 7. Мірна ємкість оснащена датчиками рівня 8. Вимірюється час, протягом якого рідина займає фіксований об'єм між датчиками рівня, а потім визначаються дискретні значення витрат.

5.4 Випробувальні установки для повірки лічильників кількості рідин

Для повірки лічильників кількості рідини використовуються випробувальні установки двох типів: об'ємні і вагові, які відрізняються принципом вимірювання кількості рідини, що протікає через лічильник.

Об'ємна випробувальна установка представлена на рисунку 5.6.

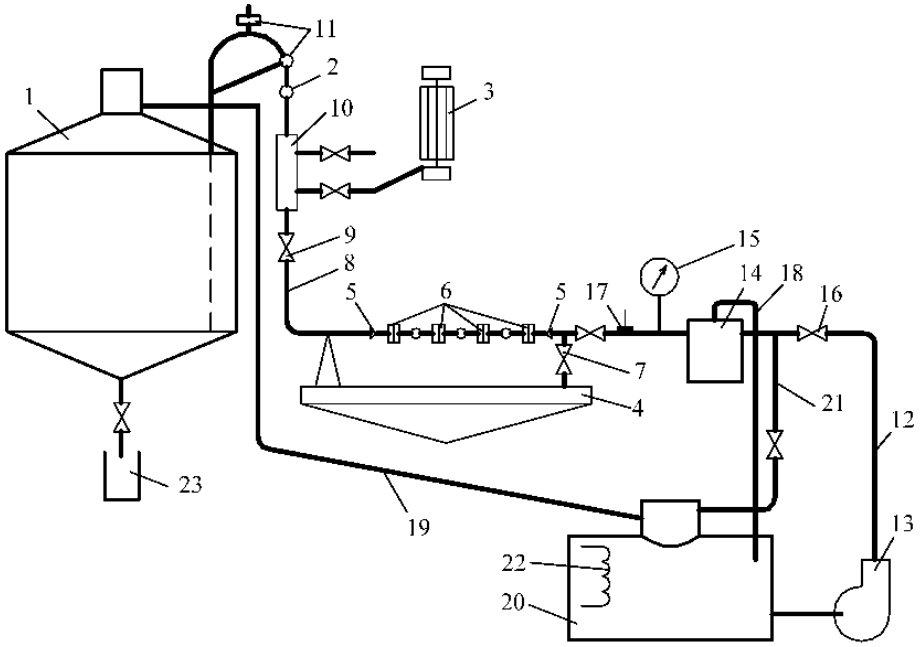


Рисунок 5.6 – Схема випробувальної установки для повірки лічильників кількості рідин

Вона складається із:

– мірного бака 1;

– пристрою для вимірювання витрат, що включає сопловий пристрій 2 і вказівник витрат 3;

– стола 4, оснащеного пристроєм 5 для під'єднання лічильників 6 до трубопроводу, зі спускним краном 7;

– трубопроводу 8, що відводить рідину від лічильників у мірний бак, оснащеного регулювальною засувкою 9, візирним склом 10 і кранами 11 для з'єднання з атмосферою;

– трубопроводу 12, що підводить рідину від насоса 13 до лічильників, з встановленим на ньому фільтром-газовідділювачем 14, манометром 15, пусковим краном 16 і термометром 17;

– трубопроводу 18, що відводить повітря з мірного бака у сховище;

– трубопроводу 19, що відводить гази і повітря із фільтру-газовідділювача 14 у сховище 20;

– розвантажувального трубопроводу 21, що відводить частину рідини із трубопроводу 12 у сховище;

– сховища (зливного бака) 20, оснащеного пристроєм 22 для нагріву або охолодження робочої рідини;

– відстійника 23.

Як правило, робочий об’єм мірного бака вибирають рівним найбільшому з наступних двох об’ємів:

– об’єму рідини, що вимірюється лічильником за п’ять обертів великої стрілки його відлікового вказівника;

– об’єму рідини, що протікає через лічильник найбільшого для даної установки калібру за 2 хв. при максимальних повірочних витратах.

Якщо правильно спроектована, виготовлена, якісно повірена установка, то за умови нормальної експлуатації гранична похибка об’ємної випробувальної установки не перевищує ±0,1 %.

Вагові випробувальні установки відрізняються від об’ємних тим, що замість мірних баків для вимірювання кількості рідини у них застосовується вага. На вазі поміщено резервуар, який під час випробування заповнюється рідиною. Об’єм резервуара вибирається з тих же міркувань, що й для об’ємних випробувальних установок.

Контрольні питання

1. Як забезпечується однозначність засобів вимірювання?
2. Що називається повіркою засобів вимірювання?
3. У чому полягає основна відмінність зразкових засобів вимірювання?
4. Які засоби використовуються як зразкові для вимірювання температури?
5. На чому ґрунтується принцип дії вантажопоршневих манометрів?
6. Як повіряються лічильники витрат рідин?

ТЕМА 6
СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОЇ ПЕРЕДАЧІ, НОРМУЮЧІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

План

6.1 Загальні відомості про вимірювальні перетворення.
6.2 Класифікація та характеристики вимірювальних перетворювачів.
6.3 Вимірювальні перетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом.
6.4 Аналогові системи передачі сигналів.
6.5 Первинні перетворювачі неелектричних величин.
6.6 Цифрові вимірювальні перетворювачі.

6.1 Загальні відомості про вимірювальні перетворення

Вимірювання застосовуються у всіх без винятку галузях науки й техніки і, власне, складають основу наукових досліджень та є невід'ємною частиною технологічних процесів. Мета будь-якого вимірювання – отримання інформації, що містить кількісну оцінку властивостей фізичного об'єкта або явища. Для отримання цієї інформації застосовуються практично всі відомі методи фізичних перетворень, які ґрунтуються на природничих законах та використовуються відповідні технічні засоби, що отримали назву – вимірювальні перетворювачі.

На практиці доводиться вимірювати сотні фізичних величин, зокрема:

– електричні та магнітні величини – струм, напругу, опір, індуктивність, індукцію та напруженість магнітного поля, магнітну проникність тощо;

– величини, що характеризують простір та час – геометричні розміри, час, параметри руху;

– механічні величини – маса та сила, а також величини, які характеризують їх прояв у просторі та часі, такі, як момент сили, тиск, механічні напруження тощо;

– теплові величини, які характеризують тепловий стан тіл, їх зміну в просторі та часі – температура, кількість теплоти, теплопровідність;

– світлотехнічні та енергетичні величини, які характеризують оптичні явища – сила світла, світловий потік, яскравість та відповідно енергетична сила світла, потужність випромінювання, енергетична яскравість;

– величини, що характеризують акустичні явища – звуковий тиск, гучність звуку, акустичний шум тощо;

– величини, які характеризують фізико-хімічні властивості речовин, зокрема хімічний склад, густину, масову чи молярну концентрацію, активність іонів водню;

– величини, які характеризують іонізуюче випромінювання.

Велика кількість видів фізичних величин, часто велика розкиданість об'єктів вимірювання у просторі, у багатьох випадках необхідність автоматизації управління з централізованим отриманням інформації, оброблення цієї інформації та вироблення сигналів для зворотної дії на об'єкт дослідження зумовлюють використання переважно електричних методів вимірювання неелектричних

величин, оскільки електричні сигнали є дуже «зручними» як для вимірювальних перетворень так і для оброблення та передачі інформації на відстань.

До основних переваг електричних вимірювань неелектричних величин належать:

– універсальність, яка полягає в можливості вимірювань декількох чи навіть багатьох неелектричних величин за допомогою одного електричного вимірювального засобу;

– простота автоматизації вимірювань внаслідок того, що в електричних засобах легко виконуються логічні та цифрові операції;

– можливість забезпечення високої чутливості, необхідної точності та швидкодії, зумовлені простотою оброблення електричних сигналів;

– дистанційність, що полягає в можливості передачі електричних сигналів з допомогою як провідних, так і безпровідних ліній зв'язку.

Вимірювання неелектричних величин електричними вимірювальними засобами стає можливим внаслідок попереднього перетворення досліджуваних величин у функціонально пов'язані з ними електричні величини за допомогою відповідних вимірювальних перетворювачів. Для проведення вимірювань необхідна наявність первинного вимірювального перетворювача, вторинного електричного приладу, а також пристроїв їх спряження. Тобто, на практиці, згідно стандартного означення, у переважній більшості для вимірювання електричних і неелектричних величин використовуються вимірювальні системи та комплекси.

Всі методи вимірювань неелектричних величин розділяються на контактні та безконтактні. За контактних методів вимірювальний перетворювач безпосередньо контактує з досліджуваним об'єктом. Ці методи порівняно нескладні у реалізації і забезпечують високу чутливість, а також можливість локалізації точки вимірювання у тому місці технологічного процесу, яке, наприклад, є найінформативнішим. Але за контактного методу вимірювання може, в окремих випадках, виникнути зворотна дія вимірювального перетворювача на параметри досліджуваного об'єкта, що приводить до спотворення результату вимірювань. Крім цього, іноді є неможливим здійснити безпосередній контакт вимірювального перетворювача з досліджуваним об'єктом.

За безконтактних вимірювань первинний перетворювач безпосередньо не контактує з досліджуваним об'єктом і не впливає на його параметри. Однак на результати вимірювань у цьому випадку значно впливає зовнішнє середовище, яке відділяє вимірювальний перетворювач від об'єкта дослідження.

Згідно з офіційним означенням, вимірювальний перетворювач – це засіб вимірювальної техніки, що створює сигнал вимірювальної інформації у формі, зручній для його передачі, зберігання, подальшого перетворення, але недоступній для безпосереднього сприйняття людиною. Для первинних перетворювачів, які безпосередньо контактують з об'єктом вимірювання, часто застосовують термін «давач» або «датчик», а також дозволений до використання термін «сенсор».

6.2 Класифікація та характеристики вимірювальних перетворювачів

На даний час використовується величезна кількість різноманітних за будовою, принципом дії та призначенням вимірювальних перетворювачів (ВП) різних фізичних величин. Розвиток науки і техніки спонукає до постійного вдосконалення існуючих ВП, та до створення нових видів.

Для їх систематизації, поділу та групування використовується ряд класифікаційних ознак. Ці ознаки повинні бути достатньо загальними, щоб враховувати вимоги як спеціалістів, які працюють в галузі дослідження та проектування перетворювачів, так і тих, хто займається їх використанням.

Для споживача класифікація ВП за природою вхідної вимірюваної величини є найдоцільнішою. Такий підхід прийнято у довідниковій літературі. Важливе значення має і природа вихідного сигналу, оскільки вона визначає вибір методів і засобів подальшого перетворення чи вимірювання. Отже, однією з основних класифікаційних ознак треба вважати природу вхідного та вихідного сигналів.

Залежно від природи вхідної і вихідної величини ВП поділяють на групи:

– перетворювачі електричних величин в електричні;

– перетворювачі неелектричних величин у електричні;

– перетворювачі електричних величин у неелектричні.

Як класифікаційні ознаки використовуються також характер функції перетворення та характер вихідного сигналу. Функції перетворення або передатні характеристики відтворюють динамічні властивості елементів. У цьому випадку визначальними є не конструктивні чи функціональні ознаки, а його математична модель.

За видом передатної характеристики перетворювачі поділяють на лінійні, нелінійні та лінеаризовані.

За виглядом функції перетворення ВП поділяють на три великі групи:

– масштабні, що змінюють в певну кількість разів розмір вхідної величини без зміни її фізичної природи;

– функціональні, що однозначно функціонально перетворюють вхідну величину зі зміною природи вхідної величини або без її зміни;

– операційні, які виконують над вхідною величиною математичні операції вищого порядку – диференціювання чи інтегрування за вхідним параметром.

За характером зміни вихідної величини можна виділити два класи елементів – аналогові, що мають неперервну у часі передатну характеристику, і дискретні, які у свою чергу розділяють на імпульсні, цифрові та релейні.

Найбільш повною прийнято вважати класифікацію за фізичними закономірностями, покладеними в основу принципу дії ВП.

За принципом дії вимірювальні перетворювачі поділяються на такі групи:

1. Механічні пружні перетворювачі. В основу принципу дії покладено залежність між вхідними механічними зусиллями і викликаними ними переміщеннями чи механічними напруженнями в матеріалі чутливого елемента, що визначаються його пружними властивостями.

2. Резистивні перетворювачі. Вихідним сигналом перетворювачів механічних величин є зміна електричного опору чутливого елементу внаслідок

переміщення повзунка в реостатних та реохордних перетворювачах або внаслідок тензоефекту в тензорезистивних перетворювачах. Резистивні перетворювачі теплових величин (терморезистивні перетворювачі) та резистивні перетворювачі хімічних величин (електрохімічні резистивні перетворювачі) належать відповідно до теплових та електрохімічних, оскільки їх дія ґрунтується на теплових та електрохімічних явищах.

3. Ємнісні перетворювачі. Принцип фізичного перетворення полягає у залежності ємності конденсатора від відстані між його електродами, площі перекриття або від зміни діелектричної проникності середовища між цими електродами, коли відстань, площа перекриття або діелектрична проникність є мірою вимірюваної величини.

4. П'єзоелектричні перетворювачі. Принцип дії оснований на використанні явища поляризації п'єзоелектрика від дії на нього механічних зусиль. Різновидом п'єзоелектричних є п'єзорезонансні перетворювачі, принцип дії яких оснований на використанні залежності резонансної частоти п'єзоелемента від значення вимірюваної величини, наприклад, температури.

5. Індуктивні перетворювачі. В основу принципу дії покладено залежність повного електричного опору намагнічувальної обмотки від зміни комплексного магнітного опору магнітного кола перетворювача, який може бути наслідком зміни проміжку в магнітному колі або результатом зміни магнітних властивостей феромагнетика, що використовується у магнітопроводі.

6. Взаємоіндуктивні або трансформаторні перетворювачі. В основу принципу дії покладено залежність ЕРС вторинної обмотки від зміни комплексного магнітного опору магнітопровода, який, як і в індуктивних перетворювачах може змінюватись від зміни величини магнітного проміжку чи магнітних властивостей матеріалу магнітопровода.

7. Індукційні перетворювачі. Принцип дії оснований на використанні явища електромагнітної індукції. Вхідними величинами таких перетворювачів може бути швидкість зміни магнітного потоку або швидкість лінійного чи кутового переміщення вимірювальної котушки.

8. Гальваномагнітні перетворювачі. Принцип дії базується на використанні гальваномагнітних ефектів Гауса або Холла. Суть ефекту Гауса полягає у зміні електричного опору провідника чи напівпровідника від проходження по ньому електричного струму та одночасної дії на нього магнітного поля, а ефекту Холла – в появі за таких умов поперечної різниці потенціалів. Основними різновидами гальваномагнітних перетворювачів є магніторезистивні перетворювачі та перетворювачі Холла.

9. Теплові перетворювачі. В основу принципу дії покладено фізичні ефекти, що визначаються тепловими процесами. Теплові перетворювачі – це, переважно перетворювачі температури. Є дві основні групи теплових перетворювачів: терморезистивні, у яких використовується залежність опору матеріалу від температури, та термометричні, в основу дії яких покладено явище виникнення термо-ЕРС у робочому спаї двох різнорідних провідників або сплавів. Теплові перетворювачі іноді використовуються для перетворення інших фізичних величин, що проявляються через теплові процеси, наприклад, хімічного складу,

концентрації, швидкості руху газів або рідин тощо.

10. Електрохімічні перетворювачі. Принцип дії заснований на залежності:

– електропровідності речовин від їх складу, концентрації, температури чи інших властивостей – електрохімічні резистивні перетворювачі;

– електродних потенціалів від активності водневих іонів – гальванічні перетворювачі іонометрів;

– різниці електричних потенціалів на межі розділу твердої та рідкої фаз від швидкості переміщення розчину – електрокінетичні перетворювачі.

11. Оптичні перетворювачі. В основу принципу дії покладено залежність параметрів оптичного випромінювання від значення перетворюваної величини. Ця величина може діяти безпосередньо на джерело випромінювання, змінюючи його інтенсивність випромінювання, або ж на оптичний канал, впливаючи на параметри оптичного потоку.

12. Іонізаційні перетворювачі. Принцип дії оснований на перетворенні інтенсивності іонізаційного чи рентгенівського випромінювання. У перетворювачах іонізаційного випромінювання вихідна електрична величина функціонально пов’язана з інтенсивністю іонізаційного чи рентгенівського випромінювання, яка є мірою досліджуваної величини.

6.3 Вимірювальні перетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом

Одним із напрямків розвитку первинних перетворювачів є подальше вдосконалення вимірювальних перетворювачів з уніфікованим вихідним сигналом (ВПУС), що забезпечують зв’язок між давачами та вхідними колами наступних елементів вимірювальних систем.

Перетворювач з уніфікованим вихідним сигналом – це первинний перетворювач (ПП) та уніфікуючий перетворювач (УП), що поєднані схемно, конструктивно і алгоритмічно для забезпечення уніфікації вихідного сигналу.

Уніфікація здійснюється за такими основними характеристиками:

– за інформативними параметрами – напруга, струм, частота, цифровий код, пневматичний тиск тощо;

– за робочим діапазоном, наприклад, (0-1) В; (0-5) мА; (4-20) мА тощо;

– за функціональною залежністю між значенням вимірюваної величини та інформативного параметра вихідного сигналу – лінійна, логарифмічна тощо.

Основні функції, що реалізує УП, можна розділити на лінійні, наприклад, встановлення нуля, масштабування, компенсація зовнішніх впливів, та нелінійні – лінеаризація функції перетворення ПП.

Загалом функція перетворення ПП є його індивідуальною характеристикою, а тому, переважно оперують номінальними функціями перетворення для кожного конкретного типу ПП.

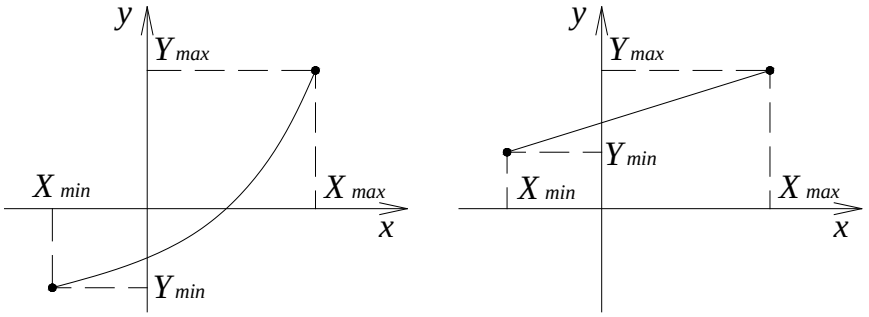
Наприклад, номінальна функція перетворення (рис. 6.1, а) умовного ПП описується залежністю $Y = f(X)$, а (X_{min} … X_{max}) і (Y_{min} … Y_{max}) – робочі діапазони значень вхідного і вихідного інформативних параметрів. Для побудови ВПУС ставиться завдання одержати уніфікований сигнал, значення інформативного

параметра якого описується лінійною залежністю (рис. 6.1, б):

$$Y_н = K(X - X_{\min}) + Y_{н\min}, \tag{6.1}$$

де

$$K = \frac{Y_{н\max} - Y_{н\min}}{X_{\max} - X_{\min}}. \tag{6.2}$$



а) б)

Рисунок 6.1 – Номінальна (а) та лінеаризована (б) функції перетворення ВПУС

Такий вид залежності можна отримати на основі послідовного з'єднання ПП та УП. Це вимагає, насамперед, погодження динамічних діапазонів Y та $Y_н$ і забезпечення лінеаризації функції перетворення:

$$Y_н = K_1(Y - Y_{\min}) + Y_{н\min}, \tag{6.3}$$

де

$$K_1 = \frac{Y_{н\max} - Y_{н\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}}. \tag{6.4}$$

Якщо $K_1 = const$, то забезпечується лише лінійне приведення динамічних діапазонів і функціональна залежність $Y_н(X)$ зберігає нелінійність. Лінеаризація досягається введенням відповідної залежності $K_1(Y)$:

$$K_1 = K\frac{X - X_{\min}}{f(X) - Y_{\min}}. \tag{6.5}$$

Оскільки УП взаємодіє лише з вихідним сигналом ПП, то знаходять обернену залежність $X = g(Y)$ та реалізують у перетворювачі, функція перетворення якого визначається:

$$K_1 = K\frac{g(Y) - X_{\min}}{Y - Y_{\min}}. \tag{6.6}$$

Відповідно, одним з можливих варіантів реалізації функції (6.6) може служити ВПУС, структурну схему якого показано на рисунку 6.2.

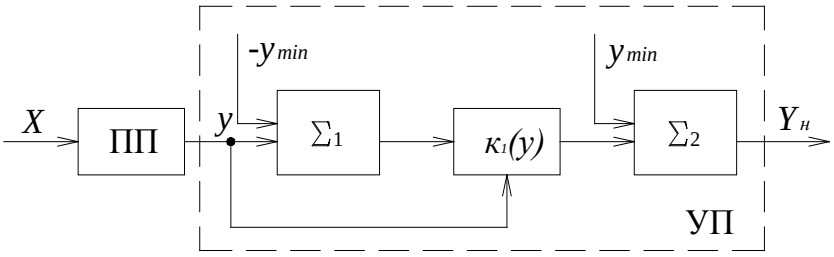


Рисунок 6.2 – Структурна схема ВПУС: ПП – первинний перетворювач; Σ_1 – суматор для приведення нижньої межі робочого діапазону Y до початку координат; $\kappa_1(y)$ функціональний вузол лінеаризації; Σ_2 – суматор для забезпечення відповідного зміщення робочого діапазону $Y_н$

Кожен з вузлів, що входять в схему ВПУС може бути розділеним на окремі складові різного ступеня складності та структури.

Найбільш поширені УП сигналів постійного струму і напруги. До таких сигналів належать, наприклад, вихідні сигнали термопар, мостових вимірювальних схем постійного струму, потенціометричних давачів, каліброваних шунтів тощо.

УП сигналів постійного струму та напруги переважно будуються на основі використання операційних підсилювачів, охоплених відповідними зворотними зв’язками. Сучасна електронна елементна база дозволяє розв’язувати більшість проблем, пов’язаних з необхідністю забезпечення високого вхідного опору, значних коефіцієнтів підсилення, низьких температурних дрейфів та високих динамічних характеристик. Значна частина УП постійного струму і напруги є лінійними, що значно спрощує їх використання.

У сучасних умовах беззаперечна перевага надається вимірювальним перетворювачам з цифровим уніфікованим сигналом. Це зумовлено високою завадозахищеністю цифрових сигналів від зовнішніх впливів та можливістю безпосереднього використання в комп’ютеризованих системах та комплексах.

6.4 Аналогові системи передачі сигналів

З електричних аналогових перетворювачів для перетворення неелектричних величин у електричний вихідний сигнал та дистанційної передачі показів, найчастіше використовуються диференціально-трансформаторні, сельсинні, резистивні та частотні перетворювачі.

6.4.1 Диференціально-трансформаторні перетворювачі

Диференціально-трансформаторні перетворювачі призначені для перетворення лінійного переміщення осердя у вихідний електричний параметр. Змінним параметром у перетворювачах цього типу є значення взаємоіндуктивності між обмотками.

У диференціально-трансформаторних перетворювачах переміщення осердя

первинного приладу врівноважується відомим переміщенням осердя вторинного приладу. Використовуються для вимірювання витрат, тиску, рівня та інших параметрів, значення яких можуть бути перетворені у переміщення осердя котушки первинного приладу.

Дифтрансформаторний перетворювач (рис. 6.3) складається з двох однакових котушок, одна з яких знаходиться у первинному перетворювачі 1, а друга – у вторинному приладі 2. Первинні обмотки котушок включені послідовно і живляться напругою змінного струму від обмотки силового трансформатора електронного підсилювача ЕП. Вторинні обмотки включені між собою зустрічно і з виходом на електронний підсилювач. Всередині котушок встановлено рухомі осердя – магнітопроводи.

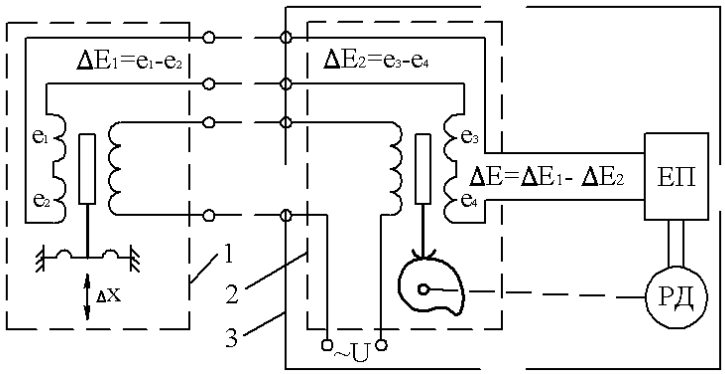


Рисунок 6.3 – Схема диференціально-трансформаторного перетворювача:
1– первинний перетворювач; 2 – вторинний перетворювач; 3 – вторинний прилад;
ЕП – електронний підсилювач; РД – реверсивний двигун

Якщо осердя знаходяться у середньому положенні, то ЕРС e_1 та e_2, які наводяться в осердях, рівні, тобто, $\Delta E_1 = e_1 - e_2 = 0$ і $\Delta E_2 = e_3 - e_4 = 0$, і різниця на вході підсилювача теж рівна нулю: $\Delta E = \Delta E_1 - \Delta E_2 = 0$.

Якщо осердя, механічно з'єднане з чутливим елементом у первинному перетворювачі 1 зміститься, то ЕРС e_1 та e_2 зміняться, і відповідно, $\Delta E \neq 0$.

Сила струму у вторинному колі котушок відповідно первинного і вторинного приладів:

$$I_п = \frac{M_1 U - M_2 U}{2Z + Z_н} = \frac{e_1 - e_2}{2Z + Z_н}; \qquad (6.7)$$

$$I_в = \frac{M_3 U - M_4 U}{2Z + Z_н} = \frac{e_3 - e_4}{2Z + Z_н}, \qquad (6.8)$$

де M_1, M_2, M_3, M_4 – коефіцієнти взаємоіндукції;

U – напруга живлення первинної обмотки;

Z – повний опір вторинної обмотки кожної котушки;

$Z_н$ – опір навантаження.

Результуюча сила струму:

$$\Delta I = I_п - I_в = \frac{U\Delta M}{2Z + Z_н}, \qquad (6.9)$$

де ΔM – результуючий приріст коефіцієнта взаємоіндукції, викликаний зміною положення осердь.

На вході підсилювача $\Delta E = \Delta I Z_н = U\Delta M /(2Z + Z_н)$. У вимірювальній схемі з виходом на електронний підсилювач можна вважати $Z_н = \infty$, тоді:

$$\Delta E = \frac{U\Delta M}{\frac{2Z}{Z_н} + 1} \approx U\Delta M \ . \qquad (6.10)$$

Отримане значення ΔE підсилюється у електронному підсилювачі ЕП до величини, необхідної для управління реверсивним двигуном РД. Двигун через профільний диск (кулачок) переміщує осердя у котушці вторинного перетворювача, що призводить до рівності ЕРС, які наводяться у обох котушках – до нового стану рівноваги. Результуюча ЕРС знову стане рівна нулю $\Delta E = 0$ і двигун зупиниться. Вал двигуна зв'язаний зі стрілкою відлікового пристрою.

Якщо переміщення осердя первинного перетворювача лежить в межах до 5 мм, то залежність ЕРС від величини переміщення практично лінійна.

Розглянутий диференціально-трансформаторний перетворювач невзаємозамінний, і вимірювальні комплекти, побудовані за такою схемою, вимагають індивідуального градуювання. В уніфікованих перетворювачах до вихідної обмотки первинного перетворювача підключено подільник, за допомогою якого можна встановлювати номінальний робочий хід осердя.

У даний час використовуються дифтрансформаторні перетворювачі з повним ходом осердя 1,6, 2,5, і 4 мм. Такі перетворювачі створюють уніфікований сигнал у вигляді напруги змінного струму, що змінюється в діапазоні (–1 – 0 – +1) В. Знак «–» вказує на зміну фази сигналу. Вказаним значенням вихідного сигналу відповідає зміна взаємоіндуктивності перетворювача (–10 – 0 – +10) мГн. Класи точності приладів для вимірювання тиску та перепаду тиску 1,0 і 1,5. Час встановлення вихідного сигналу – не більше 1 с.

6.4.2 Сельсинні системи передач інформації

Для передачі на віддаль великих кутових переміщень можуть використовуватись сельсинні системи, у яких перетворення кутових переміщень в сигнал вимірювальної інформації здійснюється сельсинами.

Сельсин – це мініатюрна трифазна електрична машина, виконана за аналогією з синхронним генератором або двигуном. Найчастіше ротор сельсина має одну обмотку (збудження), а статор – три обмотки (синхронізації), осі яких зсунуті на 120° одна відносно іншої (рис. 6.4). Обмотка збудження живиться змінним струмом; кінці трифазної обмотки з'єднані між собою.

Оскільки обмотка ротора первинного сельсина-давача Д живиться змінною напругою, то створений змінний магнітний потік буде індукувати в кожній з

обмоток статора ЕРС:

$$E_{1Д} = E_{\max}\cos\alpha;\ \ E_{2Д} = E_{\max}\cos(\alpha+120°);\ \ E_{3Д} = E_{\max}\cos(\alpha+240°), \qquad (6.11)$$

де α – кут повороту ротора сельсина; $E_{\max}$ – значення ЕРС у випадку співпадіння осей обмоток ротора і статора.

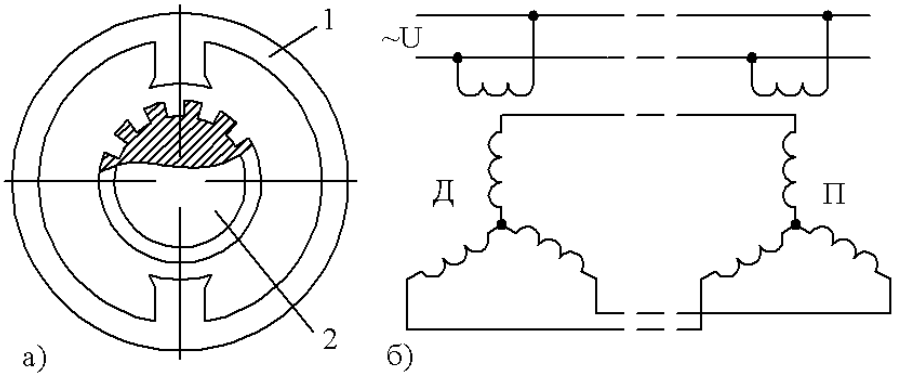


Рисунок 6.4 – Сельсинна телепередача: а – схема сельсина; б – схема включення; 1 – статор; 2 – ротор; Д – сельсин-давач; П – сельсин-приймач

Те ж і для вторинного сельсина-приймача П:

$$E_{1П} = E_{\max}\cos\beta;\ E_{2П} = E_{\max}\cos(\beta+120°);\ E_{3П} = E_{\max}\cos(\beta+240°), \qquad (6.12)$$

де β – кут повороту ротора сельсина-приймача.

Якщо положення обох роторів відносно обмоток статорів будуть однаковими, тобто $\alpha = \beta$, то сили струмів у цих обмотках теж будуть рівними внаслідок рівності ЕРС, що наводяться. У цьому випадку момент синхронізації $M_{сн}$ рівний нулю. Якщо ротор сельсина-давача відхилиться від узгодженого положення, тобто, $\alpha \neq \beta$, то значення ЕРС, які наводяться в обмотках будуть відрізнятись ($E_{iД} \neq E_{iП}$) і, відповідно, сили струмів, що виникають у зустрічно ввімкнених обмотках, не врівноважуються.

У сельсині-приймачі виникне синхронізуючий момент, який проверне ротор сельсина-приймача:

$$M_{сн} = M_{\max}\sin\theta, \qquad (6.13)$$

де $\theta = \alpha - \beta$;

$M_{\max}$ – найбільший момент, що виникає при $\theta = 90°$.

Відповідно, за постійного значення магнітного потоку однофазної обмотки ротора вихідна ЕРС, що наводиться у трифазній обмотці, буде пропорційною куту повороту.

Ротор сельсина-давача зв’язаний з чутливим елементом вимірювального перетворювача, а ротор сельсина-приймача – з відліковим пристроєм вторинного приладу.

Промислові сельсини випускаються декількох типів на частоти напруги живлення від 50 до 500 Гц.

6.4.3 Частотні електричні перетворювачі

У системах автоматичного технологічного контролю досить часто використовуються струнні частотні перетворювачі. Вихідний частотний сигнал вимірювальної інформації цих перетворювачів може бути введений безпосередньо в цифрові вимірювальні пристрої. Частотні перетворювачі мають незначну похибку і дозволяють передавати сигнал вимірювальної інформації по каналах зв'язку на значні відстані.

Струнний частотний перетворювач (рис. 6.5) складається з металевої струни 1, поміщеної між полюсними наконечники постійного магніту 2. Один кінець струни закріплений жорстко, а інший – зв'язаний з рухомим важелем 3.

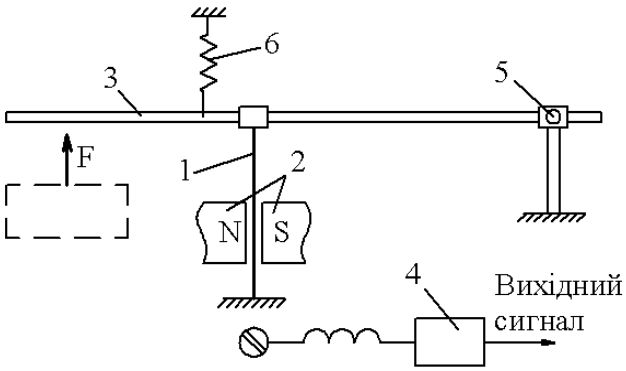


Рисунок 6.5 – Схема струнного частотного перетворювача: 1 – струна; 2 – постійний магніт; 3 – важіль; 4 – підсилювач; 5 – опора; 6 – пружина

Вимірювальний параметр діє на чутливий елемент вимірювального блоку і перетворюється у пропорційне зусилля F, яке сприймається важелем 3 та зв'язаною з ним струною 1. Якщо по струні пропускати струм, то внаслідок взаємодії його з магнітним полем постійного магніту виникають поперечні коливання струни. Частота цих коливань залежить від натягу струни під дією зусилля F. Власна частота коливань перетворюється підсилювальним пристроєм 4 у частоту змінного струму – вихідний сигнал перетворювача.

Власна частота поперечних коливань струни залежить від сили F:

$$f_0 = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{F}{\rho}}, \qquad (6.14)$$

де l – довжина робочої частини струни;

ρ – маса одиниці довжини струни.

Струна виготовляється з вольфрамового дроту діаметром 0,05 мм і довжиною близько 20 мм. Амплітуда вихідного сигналу на навантаженні з опором 1 кОм становить 0,4 В.

Нелінійність перетворення може бути скомпенсованою нелінійністю чутливого елементу вимірювального блока. Для підвищення лінійності іноді використовується дві струни, які під дією чутливого елементу піддаються натягу

у протилежних напрямках.

Для налагодження перетворювача змінюється активна довжина важеля 3, закріпленого на опорі 5. Початкове значення вихідного сигналу (1500 Гц) встановлюється з допомогою пружини 6 (коректора нуля). Дальність передачі вихідного сигналу – до декількох кілометрів.

6.5 Первинні перетворювачі неелектричних величин

Про кількість та фізичну різноманітність неелектричних величин можна зробити висновки з огляду Міжнародної системи одиниць, яка містить 7 основних одиниць, з них 6 – неелектричні, дві додаткові, а також близько 150 похідних одиниць неелектричних величин. Будова та принцип дії більшості вимірювальних перетворювачів неелектричних величин розглядаються у відповідних розділах цього навчального посібника, конкретно з методом перетворення та відповідно до умов використання. У цьому розділі розглядаються найбільш поширені «універсальні» вимірювальні перетворювачі деяких неелектричних фізичних величин у проміжний інформаційний сигнал.

6.5.1 Механоелектричні резистивні перетворювачі

Механічні пружні перетворювачі застосовуються як первинні перетворюючі елементи динамометрів, манометрів, віброметрів, акселерометрів. Вхідними величинами у них може бути сила, тиск, крутний момент, а вихідними – лінійне або кутове переміщення чи деформація. Механічний пружний елемент використовується як первинний перетворювач реостатних, ємнісних, індуктивних або тензорезистивних давачів.

Як пружні перетворювачі широко використовуються суцільні та трубчасті стержні. Загальним недоліком їх є надзвичайно малі вихідні переміщення, тому вони використовуються з тензорезистивними вторинними перетворювачами.

Кільцеві пружні елементи мають порівняно великі вихідні переміщення, що дає можливість використовувати їх в ємнісних та індуктивних давачах.

Найчутливішими до дії сил є балкові пружні елементи. Вони технологічні, деформації стискування і розтягу в них повністю ідентичні. Для отримання рівномірного розподілу напружень застосовуються балки рівномірного опору згину.

Найпоширенішим пружним перетворювачем тиску є мембрана – плоска, круглої форми пластинка, защемлена по периметру. Вона може використовуватись як перетворювач тиску в деформацію або як перетворювач тиску в переміщення.

Як пружні перетворювачі тиску використовуються також циліндричні оболонки та трубки Бурдона.

Для перетворення крутних моментів використовуються суцільні і порожнисті вали або плоскі торсіони.

Реостатні перетворювачі. Реостатним називається резистивний перетворювач, виконаний у вигляді реостата, повзунок якого переміщується під дією вхідної вимірюваної величини. Вихідною величиною є електричний опір. Реостатні перетворювачі використовуються для вимірювання лінійних і кутових

переміщень, а також величин, які попередньо можуть бути перетворені у переміщення.

У приладах серійного виробництва для роботи з реостатними перетворювачами використовуються мостові логометричні схеми (рис. 6.6).

У схемі на рисунку 6.6 опори ліній $R_л1$ та $R_л2$ додаються з опорами R_x та $R3$, увімкненими в суміжні плечі моста. В результаті, за умови, що $R1 = R2$ та $R_x = R3$, вплив опору ліній, а також їх зміни в результаті зміни температури, взаємно компенсуються. За інших значень – $R_x \neq R3$, вплив опору ліній або їх змін буде незначним і на результати вимірювання впливати не буде.

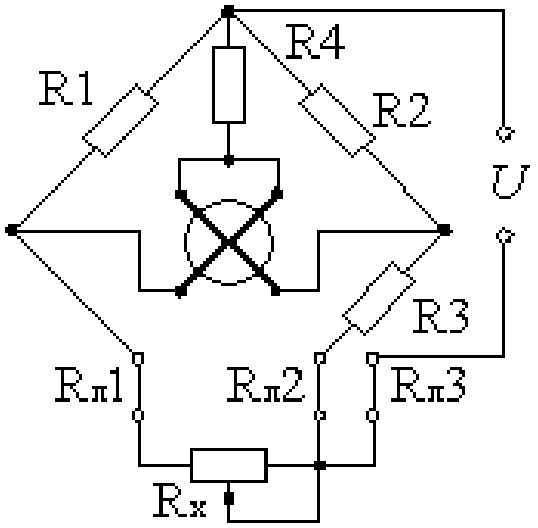


Рисунок 6.6 – Мостова логометрична схема

Тензорезистивні перетворювачі. В основі принципу дії тензорезисторів лежить явище тензоефекту, суть якого полягає в зміні електричного опору провідникового матеріалу від його механічної деформації. Основною характеристикою є коефіцієнт відносної тензочутливості, що визначається як відношення відносної зміни опору до відносного видовження провідника:

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}. \qquad (6.15)$$

У практиці електричних вимірювань тензоефект використовується у двох напрямках. Це, по-перше, тензоефект у провіднику чи напівпровіднику в результаті об’ємного стискання. Вхідною величиною таких перетворювачів є тиск газу чи рідини, що їх оточують.

Суть другого напряму полягає у використанні тензоефекту, викликаного розтягуванням чи стискуванням тензочутливого матеріалу. Перетворювачі цієї групи можуть бути виконані у вигляді наклеюваних дротяних тензоперетворювачів, фольгових, плівкових чи так званих навісних тензоперетворювачів.

Дротяний тензоперетворювач (рис. 6.7, а) має підкладку 1 з тонкого паперу або лакової плівки, на котру наклеюється тензочутливий елемент 2, виконаний з дроту. До кінців приєднані виводи 3 з тонкого мідного дроту. Зверху перетворювач покритий шаром лаку 4.

Фольгові тензорезистори (рис. 6.7, б) – це тонка стрічка з фольги завтовшки 0,01-0,02 мм, на якій частина матеріалу вибрана, наприклад, травленням так, щоб утворилась решітка з виводами. Ця решітка закріплюється між двома плівками з лаку.

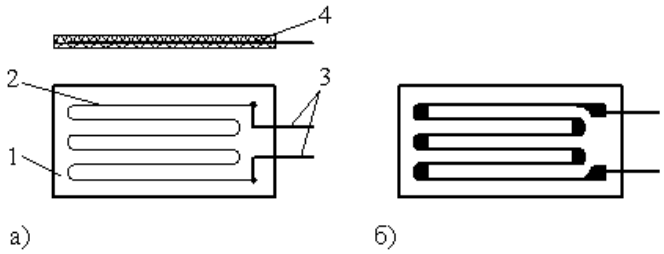


Рисунок 6.7 – Будова тензорезисторів: а) дротяний; б) фольговий

Напівпровідникові монокристалічні тензорезистори виготовляються головним чином з германію або кремнію, які мають кубічну кристалічну гратку.

Вимірювальними схемами тензорезистивних перетворювачів у більшості є мостові схеми постійного струму (рис. 6.8).

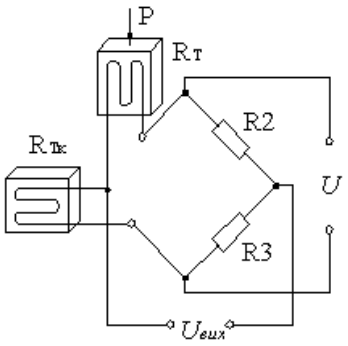


Рисунок 6.8 – Мостова схема під’єднання тензорезистора

Тензорезистор R_T вмикається в одне з пліч моста. Для компенсації температурної похибки в суміжне плече вмикається неробочий тензорезистор $R_{Tк}$, аналогічний робочому і поставлений в однакові температурні умови.

6.5.2 П’єзоелектричні та ємнісні перетворювачі

П’єзоелектричні перетворювачі. Принцип дії п’єзоелектричних перетворювачів оснований на використанні прямого або зворотного п’єзоефектів. Суть прямого п’єзоелектричного ефекту полягає в поляризації певного класу діелектриків, названих п’єзоелектриками, якщо виникає механічне напруження в їх кристалах. Зворотний п’єзоефект проявляється в деформації п’єзоелектрика в електричному полі.

П’єзоелектричні елементи використовуються як перетворювачі тиску, сил, прискорень та для інших неелектричних величин. Як матеріал для виготовлення цих перетворювачів найчастіше використовується кварц, а також штучно

поляризована п’єзокераміка на основі титанату барію, титанату свинцю, цирконату свинцю. П’єзоелектричні перетворювачі відрізняються простотою конструкції з можливості мініатюрного виконання, надійністю роботи, високою точністю.

Вимірювальні кола п’єзоелектричних давачів виконуються у вигляді підсилювачів напруги з високим вхідним опором (рис. 6.9).

Еквівалентна ємність вимірювального кола C складається з ємності перетворювача C_0, ємності під’єднувального кабеля $C_к$ і вхідної ємності вимірювальної схеми: $C = C_0 + C_к + C_1$.

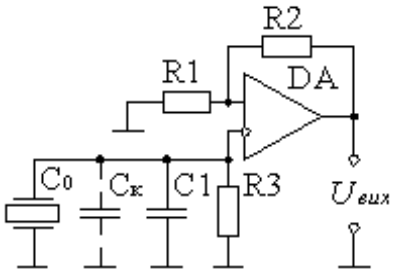


Рисунок 6.9 – Вимірювальна схема п’єзоелектричного перетворювача

Напруга, що подається на вхід підсилювача:

$$U_{вх} = \frac{q}{C} \cdot \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}, \tag{6.16}$$

а вихідна напруга підсилювача буде становити:

$$U_{вих} = \frac{q(1 + R_2 / R_1}{C} \cdot \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}, \tag{6.17}$$

де $C = C_0 + C_к + C_1$.

Основним недоліком схеми є залежність вихідної напруги від ємності кабеля $C_к$, яка може змінюватись залежно від положення кабеля і зовнішніх чинників – температури або вологості. Для зменшення впливу зміни ємності кабелю на чутливість, паралельно до входу підсилювача вмикається стабілізуючий конденсатор С1.

П’єзорезонансні перетворювачі. Основу п’єзорезонансного частотного давача складає п’єзорезонатор, частота якого є функцією вимірюваної величини. Використовуються термочутливі, тензочутливі та масочутливі резонансні перетворювачі.

П’єзорезонансні кварцові термоперетворювачі (рис. 6.10) виконуються у вигляді дискового кварцового резонатора 1, закріпленого на пружних виводах 2 і 3, які виконують одночасно роль струмовідводів. Резонатор розміщений у металевому герметизованому корпусі діаметром 6-8 мм, заповненому, для зменшення теплоінерційності, гелієм.

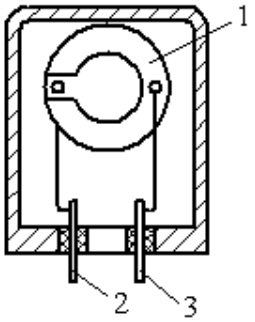


Рисунок 6.10 – Будова кварцового термочутливого резонатора

Ємнісні перетворювачі – це електричні конденсатори, ємність яких змінюється внаслідок зміни величини відстані між обкладинками, площі перекриття обкладинок або діелектричної проникності середовища, що знаходиться між обкладинками. Вони є складовими елементами ємнісних манометрів, динамометрів, віброметрів та акселерометрів.

Всі ємнісні перетворювачі можна поділити на дві групи: плоско- паралельні та коаксіальні.

Ємність конденсатора з плоскопаралельними обкладинками:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{\delta}, \tag{6.18}$$

де ε_0 – діелектрична проникність середовища між обкладками;

ε – діелектрична стала;

S і δ – площа і відстань між обкладинками.

Ємність коаксіального перетворювача:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln(1 + d / R_1)}, \tag{6.19}$$

де l – довжина обкладинок;

d – відстань між електродами;

R_1 – радіус внутрішньої обкладки.

Ємнісні перетворювачі тиску. Чутливими елементами ємнісних перетворювачів тиску є мембрани та діафрагми, які перетворюють вимірюваний тиск у переміщення.

Для мембранної діафрагми відносна зміна ємності буде пропорційна вимірюваному тиску:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{R^2}{8\delta W} P_x, \tag{6.20}$$

де R – радіус мембрани;

W – величина прогину мембрани;

δ – відстань між мембраною та нерухомою обкладкою за відсутності тиску.

В основу вимірювальних схем ємнісних перетворювачів покладаються такі структури: подільники напруги, вимірювальні мости, ємнісно-діодні кола, резонансні контури.

Схема перетворювача лінійних переміщень, що викликають зміну віддалі між обкладками конденсатора С2 може бути побудована за принципом подільника напруги (рис. 6.11).

Для такої схеми $U_{вих} = U_{вх} C_1 / C_2$. Якщо схема застосовується для вимірювання переміщень із зміною проміжку δ між обкладками C_2, то

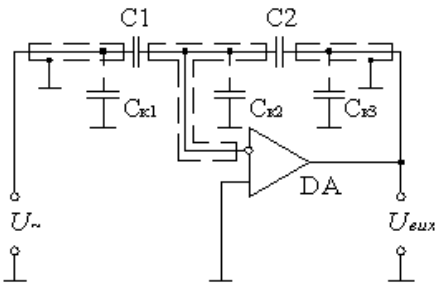


Рисунок 6.11 – Вимірювальна схема ємнісного перетворювача

$$U_{вих} = U_{вх} \frac{C_1}{C_2} = U_{вх} \frac{\delta_2}{\varepsilon\varepsilon_0 S_2}, \qquad (6.21)$$

тобто вихідна напруга буде лінійною функцією δ_2.

Диференціальні ємнісні перетворювачі, як правило, працюють зі схемами трансформаторних вимірювальних мостів.

6.5.3 Електромагнітні перетворювачі

Індуктивні перетворювачі. Індуктивні перетворювачі застосовуються для перетворення переміщень та інших механічних величин, які можуть бути попередньо перетворені у переміщення. Основні різновиди: перетворювачі зі змінною довжиною повітряного проміжку, перетворювачі плунжерного типу, перетворювачі з зубчатим проміжком та перетворювачі з розподіленими параметрами.

Найпростішим різновидом індуктивного перетворювача зі змінною довжиною повітряного проміжку є перетворювач малих переміщень (рис. 6.12).

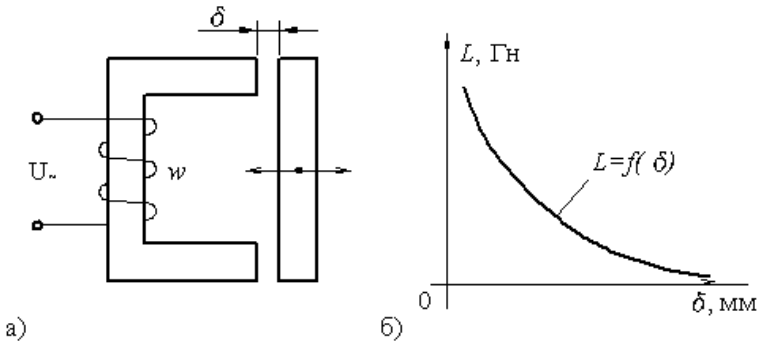


Рисунок 6.12 – Індуктивний перетворювач (а) і його статична характеристика (б)

Такий перетворювач має високу чутливість до вхідної величини, незначну чутливість до дії зовнішніх магнітних полів, порівняно невисоку власну ємність. Інформативним параметром індуктивного перетворювача зі змінною довжиною повітряного проміжку є еквівалентна індуктивність L, значення якої є функцією комплексного опору $z_м$ магнітного кола цього перетворювача.

На практиці для індуктивних перетворювачів часто використовуються мостові схеми з диференціальними перетворювачами (рис. 6.13).

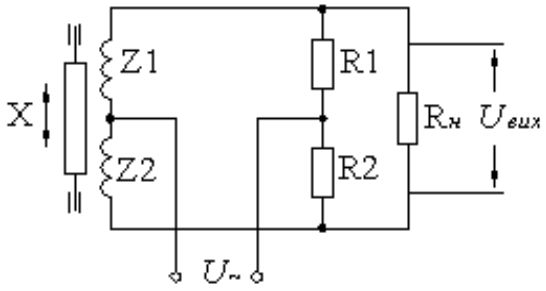


Рисунок 6.13 – Мостова схема підключення диференціального індуктивного перетворювача

У цих схемах два плеча становлять повні опори секцій диференціального перетворювача z_1 і z_2, а два інших – активні опори R_1 і R_2.

Диференціальні індуктивні перетворювачі мають вищу чутливість і значно покращену лінійність передатної характеристики.

Індукційні перетворювачі. Принцип дії індукційних перетворювачів оснований на використанні явища електромагнітної індукції. Всі індукційні перетворювачі поділяються на дві групи.

До першої належать перетворювачі, у яких зміна магнітного потоку відбувається внаслідок переміщення котушки в магнітному полі постійного магніту, або навпаки – переміщення постійного магніту відносно нерухомої котушки.

До другої групи входять магнітні перетворювачі, в яких магнітний потік, що зчіплюється з витками котушки, змінюється від зміни опору магнітного кола, наприклад, внаслідок зміщення рухомого феромагнітного елемента.

У перетворювачах першої групи ЕРС, що наводиться у вимірювальній обмотці:

$$e = -Bl\frac{dx}{dt} \tag{6.22}$$

або

$$e = -BS\frac{d\alpha}{dt}, \tag{6.23}$$

де B – індукція в робочому проміжку;

$l = \pi Dw$ – активна довжина вимірювальної обмотки (рамки);

$S = \frac{\pi D^2}{4} w$ – активна площа рамки;

D – середній діаметр обмотки;

x та α – лінійне та кутове переміщення, відповідно;

w – кількість витків.

У перетворювачах зі змінним магнітним опором:

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt} = \frac{wF_M}{R_M^2}\frac{dR_M}{dt}, \qquad (6.24)$$

де F_M – магніторушійна сила;

R_M – магнітний опір.

Індукційні перетворювачі використовуються для вимірювання швидкості лінійних переміщень, вібрацій, частоти обертання та витрат рідин і газів.

6.6 Цифрові вимірювальні перетворювачі

Сигнали вимірювальної інформації поділяються на аналогові, що мають неперервну в часі передатну характеристику, і дискретні або цифрові – імпульсні сигнали, однакові за тривалістю, але різні за рівнем. Вимірювальні засоби, в основу роботи яких покладено використання імпульсних сигналів, називаються цифровими.

Цифрові засоби вимірювальної техніки виникли через потребу у суттєвому підвищені точності, швидкодії і чутливості засобів вимірювання. Цифрові вимірювальні засоби розділяються на аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), цифрові вимірювальні прилади та цифрові вимірювальні системи.

АЦП не мають відлікових або реєструючих пристроїв, вони є базовим елементом цифрових вимірювальних приладів або систем.

ЦАП призначені для зворотного перетворення кодових сигналів у пропорційні аналогові. Вони використовуються для створення аналогових сигналів, наприклад, для управління в системах автоматичного керування.

Цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) є засобами вимірювання, які автоматично видають значення вимірюваної величини на цифровому відліковому пристрої – індикаторі, табло, дисплеї тощо. Цифровими вимірювальними системами (ЦВС) називається сукупність вимірювальних пристроїв, вимірювальних каналів та допоміжних пристроїв, об’єднаних для створення та аналізу сигналів цифрової вимірювальної інформації про декілька одно- або різнорідних фізичних величин.

6.6.1 Аналого-цифрові перетворювачі

У аналого-цифровому перетворювачі здійснюються три базові операції над вхідною величиною: її часова дискретизація, квантування за рівнем і кодування отриманих квантованих значень. Дискретизація сигналу означає заміну неперервної у часі величини її окремими вибірками, взятими у певні моменти

часу (рис. 6.14, а).

Суть квантування полягає у заміні неперервних значень сигналу в області його інтенсивності (рівня) квантованими (дозволеними) значеннями, подібно до заокруглення чисел (рис. 6.14, б).

Кодування результату аналого-цифрового перетворення – це операція його представлення за допомогою сукупності символів (коду) вибраної системи числення, що здійснюється за певними правилами. Для цього використовується числове кодування – операція переводу числового значення деякої величини N_x в іншу систему числення. Незалежно від використовуваної системи числення, результати перетворення АЦП переважно подаються бінарними символами, тобто лише двома різними рівнями.

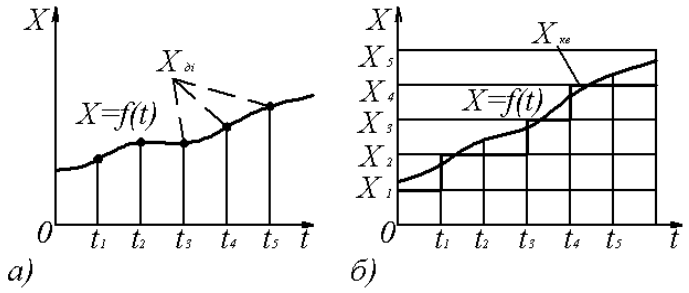


Рисунок 6.14 – Дискретизація у часі (а) та квантування за рівнем (б) вимірюваної аналогової величини

Крім безпосереднього кодування результатів аналого-цифрового перетворення, у вимірювальній техніці кодування використовується також у пристроях відображення результатів, а також з метою захисту від завад під час передачі каналами зв’язку.

Існують різні методи аналого-цифрового перетворення, які можна класифікувати за різними ознаками (рис. 6.15).

Залежно від роду величин перетворення та використаного методу квантування можна виділити три основні способи аналого-цифрового перетворення: з квантуванням просторових параметрів, частотно-часових параметрів та параметрів інтенсивності вимірювальних сигналів. У АЦП з просторовим перетворенням здійснюється порівняння величини вимірювання (переміщення, кута повороту тощо) з відомою величиною, яка задається за допомогою спеціальних пристроїв – кодових масок, лінійок чи дисків, причому всі розряди кодів визначаються одночасно. В електромеханічних АЦП кодова лінійка або диск зміщується пропорційно величині перетворення відносно нерухомого пристрою зчитування, а в електронних АЦП навпаки – маска нерухома, а зміщується зчитувальний промінь електронно-променевої трубки, що дозволяє перетворити вхідну величину в переміщення, а потім – у відповідний код. АЦП з просторовим перетворенням призначаються для вимірювання лінійних та кутових величин з похибкою в межах ±(0,02…1)%. Основною операцією цифрових засобів вимірювань з квантуванням частотно-часових параметрів є підрахунок кількості імпульсів – число-імпульсне перетворення, у якому результат визначається кількістю імпульсів n, що надійшли в лічильник.



Рисунок 6.15 – Схема класифікації аналого-цифрових перетворень

Метод послідовного підрахунку застосовується у вимірювачах частотно-часових параметрів неперервних та імпульсних сигналів, зокрема, частоти, періоду, фази, відношення частот тощо.

У АЦП з квантуванням параметрів інтенсивності перетворення може виконуватись паралельним або послідовним способом. У паралельних АЦП операції дискретизації та квантування вхідних сигналів з наступним кодуванням виконується одночасно, що забезпечує високу швидкодію.

На сучасному етапі найбільшу інформативність забезпечують цифрові засоби з сигма-дельта перетворенням. Сигма-дельта перетворення полягає у квантуванні різниці (дельта) між поточним значенням сигналу та сумою (сигма) попередніх різниць.

6.6.2 Цифро-аналогові перетворювачі

Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) призначені для перетворення кодового сигналу в напругу або струм. ЦАП використовуються як вузли зворотного зв’язку АЦП та для формування вихідних сигналів цифрових вимірювальних пристроїв.

Для перетворення двійкового коду в аналоговий сигнал формуються струми, пропорційні вазі розрядів коду, після чого підсумовуються ті із струмів, які відповідають ненульовим (одиничним) розрядам вхідного коду.

Спрощену схему ЦАП подано на рисунку 6.16. Опорна напруга U_0 ЦАП подається на всі вагові резистори 2^0R, 2^1R,…, 2^iR,…, $2^{n-2}R$, $2^{n-1}R$, інші виводи яких під’єднані до входів перемикача струмів *ПС*. Один вихід перемикача струмів

сполучений із спільною шиною, а другий – із входом перетворювача струму на напругу (підсилювач *ОП* та резистор зворотного зв'язку $R_{з.з.}$).

Завдяки такому включенню незалежно від поданого коду керування через *i*-й ваговий резистор 2^iR завжди протікає струм $I_i = \frac{U_0}{2^i R}$, який за наявності одиниці в *i*-му розряді вхідного коду *N* замикається через резистор $R_{з.з.}$, а в протилежному випадку стікає на загальну шину. Вихідна напруга $U_{вих}$ ЦАП визначається як спад напруги на резисторі $R_{з.з}$ від суми струмів I_i:

$$U_{вих} = U_0 \sum_{i=0}^{n-1} a_i \frac{R_{з.з}}{2^i R} = U_0 \frac{N}{N_{\max}}, \qquad (6.25)$$

де a_i – комутаційний коефіцієнт (a_i = 1, якщо в *i*-му розряді вхідного коду *N* є одиниця і a_i = 0 – у протилежному випадку);

N, $N_{\max}$ – відповідно, вхідний код керування та його максимальне значення.

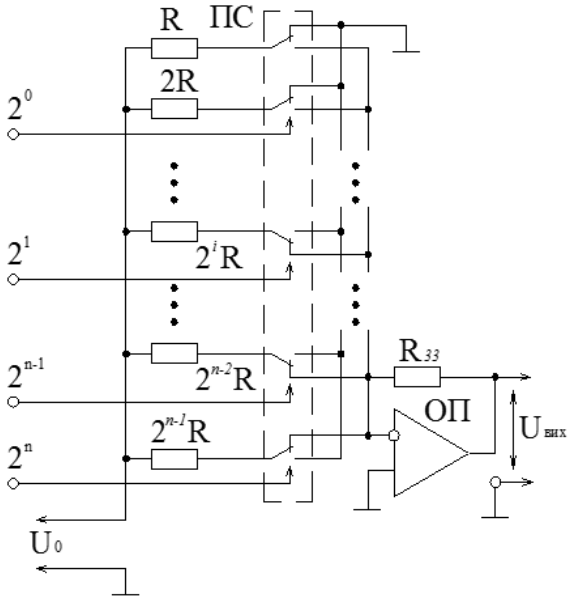


Рисунок 6.16 – Спрощена структура ЦАП з підсумовуванням розрядних струмів

Проблемами описаного ЦАП є велика кількість прецизійних резисторів з різними номіналами, а також обмеженість мінімального опору *R* ЦАП через вплив опорів замкнених ключів перемикача струмів, суттєвий вплив опорів ізоляції для багаторозрядних ЦАП.

Ці недоліки усунені в ЦАП з матрицею R-2R (рис. 6.17), принцип дії якої полягає у поділі вдвічі струмів у кожному її вузлі.

Застосування матриці типу R-2R дозволяє суттєво зменшити кількості номіналів прецизійних резисторів. Завдяки невеликим розмірам резистивної матриці в інтегральній мікросхемі, і температура, і температурні коефіцієнти, і часові дрейфи всіх резисторів приблизно однакові, що забезпечує високі температурну та часову стабільність таких ЦАП.

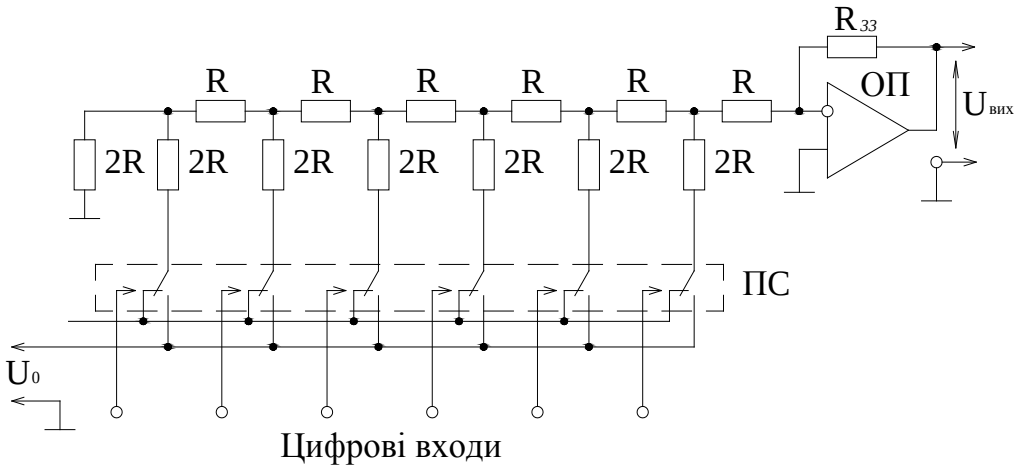


Рисунок 6.17 – Структурна схема ЦАП з R-2R – матрицею

У перетворювачі формуються два вихідні струми: I_i, пропорційний до коду керування N, та $I_2 = I_{1\max} - I_1$, де $I_{1\max}$ – максимальне значення вхідного струму I_1, яке відповідає максимальному значенню коду $N_{\max}$.

Вихідний струм I_1 ЦАП протікає через резистор зворотного зв'язку $R_{з.з.}$ і формує його вихідну напругу $U_{вих}$:

$$U_{вих} = -U_{вх}\frac{N}{N_{\max}}, \qquad (6.26)$$

де $U_{вх}$ – вхідна напруга перетворювача.

Контрольні питання

1. У чому полягає мета вимірювання фізичної величини?
2. За якими признаками виконується класифікація вимірювальних перетворювачів?
3. Що спонукало застосування вимірювальних перетворювачів з уніфікованим вихідним сигналом у практиці вимірювань?
4. Які типи аналогових перетворювачів використовуються найчастіше?
5. Чому в техніці вимірювань завжди надається перевага застосуванню вимірювальних перетворювачів з електричним виходом?
6. З якою метою використовуються механічні пружні перетворювачі і який принцип покладено в основу їх дії?
7. У чому полягає суть квантування інформаційних сигналів за рівнем та дискретизацією їх у часі?
8. Яке основне призначення аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів у вимірювальній техніці?

ТЕМА 7
МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

План

7.1 Основні поняття про температуру. Температурні шкали.
7.2 Класифікація засобів для вимірювання температури.
7.3 Термометри розширення.
7.4 Термоелектричні термометри.
7.5 Прилади для вимірювання термоелектрорушійної сили.
7.6 Електричні термометри опору.
7.7 Пірометри випромінювання.
7.8 Цифрові прилади для вимірювання температури.
7.9 Тепловізори.

7.1 Основні поняття про температуру. Температурні шкали

Температурою називають величину, яка характеризує тепловий стан тіла. Згідно кінетичної теорії температуру визначають як міру кінетичної енергії поступального руху молекул. Таким чином, температурою називають умовну статистичну величину, прямопропорційну середній кінетичній енергії молекул тіла. Від дотику двох тіл, наприклад газів, перехід тепла від одного тіла до другого буде відбуватись до того часу, доки значення середньої кінетичної енергії поступального руху молекул цих тіл не зрівняються. Зі зміною середньої кінетичної енергії рух молекул тіла змінює ступінь його нагрітості, і разом з цим змінюються його фізичні властивості. За даної температури кінетична енергія кожної окремої молекули тіла може значно відрізнятися від його середньої кінетичної енергії. Тому поняття температури є статистичним і може стосуватись тільки тіла, яке складається з достатньо великої кількості молекул. Для окремої молекули поняття температури втрачає смисл.

За другим законом термодинаміки температуру T можна визначити з відношення температур T_1 та T_2 і відношення відповідних кількостей тепла Q_1 та Q_2, отриманого і відданого у циклі Карно:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}. \qquad (7.1)$$

Таким чином, можна встановити числові значення температури, якщо прийняти деякі значення її для двох основних реперних точок. Тому температурою можна назвати міру відхилення термодинамічного стану тіла від довільно вибраного стану теплової рівноваги.

Температура не піддається безпосередньому вимірюванню. Тому про стан теплової рівноваги і про значення температури судять за зміною фізичних властивостей тіл.

Можливість вимірювати температуру термометром основана на явищі теплового обміну між тілами з різним ступенем нагрітості і на зміні термометричних властивостей речовин від нагрівання. Відповідно, для створення термометра і побудови температурної шкали, здавалось би, можна вибрати будь-яку термометричну властивість, що характеризує стан тієї або іншої речовини і на основі його вимірювань побудувати шкалу температур. Але зробити такий вибір зовсім не просто, бо термометрична властивість повинна однозначно змінюватись зі зміною температури, не залежати від інших факторів і допускати можливість її вимірювання порівняно простим та зручним способом. В дійсності не існує ні однієї термометричної властивості, яка повністю могла б задовольнити всі вимоги на всьому інтервалі вимірювання температур.

Всі температурні шкали будувались однаковим шляхом: двом постійним точкам присвоювались певні числові значення і допускалось, що видима термометрична властивість речовини, яка використовується в термометрі, лінійно зв'язана з температурою t:

$$t = kE + D, \tag{7.2}$$

де k – коефіцієнт пропорційності;

E – термометрична властивість речовини;

D – стала.

Прийнявши для двох постійних точок певні значення температур, можна обчислити сталі k та D і, на цій основі, побудувати температурну шкалу.

Для розмітки температурної шкали найчастіше використовували об'ємне розширення тіл від нагрівання, а за сталі точки приймали температури кипіння води та розтавання льоду. На цьому принципі основані температурні шкали, створені Ломоносовим, Фаренгейтом, Реомюром та Цельсієм.

Перша температурна шкала була запропонована і впроваджена Д. Г. Фаренгейтом у 1724 р. В основу шкали він поклав три точки: 1 – «точка надзвичайного холоду», прийнята за нульову відмітку (за сучасною шкалою ≈ – 17,8°С); 2 – точка плавлення льоду, визначена ним у +32° та нормальна температура людського тіла, визначена у +96° (за сучасною шкалою це становить +35,6°С) – 3-я точка.

У 1742 р. А. Цельсій, використовуючи ртуть у скляних термометрах, позначив точку плавлення льоду за 100°С, а точку кипіння води за 0°С. Таке позначення було незручним і через три роки Штремер запропонував змінити позначення на зворотні.

У 1848 р. Кельвін запропонував побудувати температурну шкалу на термодинамічній основі, прийнявши за нульове значення температуру абсолютного нуля і позначивши температуру плавлення льоду +273,1°. Термодинамічна температурна шкала ґрунтується на другому законі термодинаміки. Як відомо, робота в циклі Карно пропорційна різниці температур і не залежить від термодинамічної речовини. Один градус по термодинамічній шкалі відповідає такому підвищенню температури, яке відповідає 1/100 частині

роботи по циклу Карно між точками плавлення льоду та кипіння води за нормального атмосферного тиску.

Термодинамічна шкала аналогічна шкалі ідеального газу, побудованої на залежності тиску ідеального газу від температури. Закони зміни тиску від температури для реальних газів відрізняються від ідеальних, але поправки на відхилення реальних газів незначні і можуть бути встановлені з високим ступенем точності. Тому, спостерігаючи за розширенням реальних газів і ввівши поправки, можна оцінити температуру по термодинамічній шкалі.

Д. І. Менделєєв у 1874 р. вперше науково обґрунтував доцільність побудови термодинамічної температурної шкали не за двома реперними точками, а за однією. Така шкала має значні переваги і дозволяє точніше визначати термодинамічну температуру.

Міжнародна температурна шкала (МТШ) є практичним здійсненням термодинамічної стоградусної температурної шкали, у якій температура плавлення льоду і температура кипіння води за нормального атмосферного тиску відповідно позначені через 0° та 100°.

МТШ ґрунтується на системі постійних, точно відтворюваних температур рівноваги (постійних точок), яким присвоєні числові значення. Для визначення проміжних температур служать інтерполяційні прилади, відградуйовані по цих постійних точках.

Основні постійні точки МТШ та присвоєні їм числові значення:

а) температура рівноваги між рідким та газоподібним киснем (точка кипіння кисню) – 182,97°;

б) температури рівноваги між льодом та водою, насиченою повітрям (точка плавлення льоду) – 0,000°;

в) температура рівноваги між рідкою водою і її парою (точка кипіння води) – 100,000°;

г) температура рівноваги між рідкою сіркою та її парою (точка кипіння сірки) – 444,60°;

д) температура рівноваги між твердим та рідким сріблом (точка затвердіння срібла) – 960,5°;

е) температура рівноваги між твердим та рідким золотом (точка затвердіння золота) – 1063,0°.

Міжнародна практична температурна шкала (МПТШ) теж базується на шести постійних первинних точках. Але в МПТШ були внесені уточнення:

1. Замість точки плавлення льоду використовується точка рівноваги між льодом, рідкою водою та водяною парою – потрійна точка води, якій присвоєно значення +0,01°.

2. Температурні рівноваги між твердим і рідким сріблом присвоєно нове значення – 960,8°.

3. Всі постійні точки, крім потрійної точки води, визначаються за одної нормальної атмосфери, рівної тиску 101325 Н/м^2.

4. Замість точки кипіння сірки рекомендується використовувати точку рівноваги між твердим і рідким цинком (точка затвердіння цинку) – 419,505°С.

Деякі постійні точки МПТШ представлено у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Деякі постійні точки МПТШ

№ точки	Стан рівноваги	Присвоєне значення температури	
		К	°С
1	Між твердою, рідкою і газоподібною фазою водню (потрійна точка водню)	13,81	– 259,34
6	Між рідкою та газоподібною фазами кисню (точка кипіння кисню)	90,188	– 182,962
7	Між твердою, рідкою та пароподібною фазами води (потрійна точка води)	273,16	0,01
8	Між рідкою і пароподібною фазами води (точка кипіння води)	373,15	100
9	Між твердою і рідкою фазами цинку (точка затвердіння цинку)	692,73	419,58
10	Між твердою та рідкою фазами срібла (точка затвердіння срібла)	1235,08	961,93
11	Між твердою та рідкою фазами золота (точка затвердіння золота)	1337,58	1064,43

Основна одиниця термодинамічної температури T названа кельвін і позначається К. Кельвін є 1/273,16 частина термодинамічної температури потрійної точки води.

Одиниця, яка застосовується для вираження температури Цельсія – градус Цельсія °С.

Різниця температур може бути виражена або в кельвінах, або в градусах Цельсія:

$$t = T - 273{,}15\,\text{К}. \tag{7.3}$$

Передача розміру одиниці температури, а разом з цим і практичних температурних шкал від еталонів зразковим засобам вимірювань і від них до робочих засобів вимірювань з зазначенням похибки, виконується у відповідності з повірочними схемами, затвердженими відповідними стандартами.

7.2 Класифікація засобів для вимірювання температури

Температуру вимірюють за допомогою пристроїв, у яких використовуються різні термометричні властивості рідин, газів або твердих тіл. Існують десятки різних технічних пристроїв, які використовуються для вимірювання температури в промисловості, у наукових дослідженнях та зі спеціальною метою. У таблиці 7.2 наведені найбільш поширені пристрої для вимірювання температури та практичні межі їх використання.

Таблиця 7.2 – Практичні межі застосування найбільш поширених пристроїв для промислових вимірювань температур

Термометрична властивість	Назва пристрою	Межі вимірювання, °С	
		нижня	верхня
Теплове розширення	Рідинні скляні термометри	–190	600
Зміна тиску	Манометричні термометри	–160	600
Зміна електричного опору	Електричні термометри опору. Напівпровідникові термометри (термістори, терморезистори)	–200 –90	500 180
Термоелектричні ефекти (термо-е.р.с.)	Термоелектричні термометри (термопари). Термопари спеціальні	–50 1300	1600 2500
Теплове випромінювання	Оптичні пірометри. Радіаційні пірометри. Фотоелектричні пірометри. Колірні пірометри	700 20 600 1400	6000 3000 4000 2800

Термометром називають пристрій або прилад, що служить для вимірювання температури шляхом перетворення її у покази або сигнал, який є відомою функцією температури.

Чутливим елементом термометра називають частину, яка перетворює теплову енергію в інший вид енергії для отримання інформації про температуру.

Розрізняють термометри контактні і безконтактні. Чутливий елемент контактного термометра входить у безпосередній контакт з середовищем вимірювання.

Пірометром називають безконтактний термометр, дія якого основана на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл.

7.3 Термометри розширення

7.3.1 Рідинні скляні термометри

Дія скляних рідинних термометрів (рис. 7.1) основана на різниці коефіцієнтів теплового розширення термометричної речовини та оболонки, у якій вона знаходиться (термометричне скло або кварц).

У якості термометричної речовини у скляних термометрах, крім ртуті, застосовуються інші рідини, переважно органічного походження (таблиця 7.3).

Основна перевага скляних рідинних термометрів – простота використання і достатньо висока точність вимірювання, навіть для термометрів серійного виготовлення.

Термометри випускаються наступних різновидів:

1. Технічні ртутні з вкладеною шкалою, з зануренням робочої частини у вимірювальне середовище, прямі та кутові зі шкалами від –35 до +50°С та від 0 до +500°С.

2. Лабораторні ртутні палочні або з вкладною шкалою, прямі з зовнішнім діаметром 5-11 мм. За границями вимірювання і ціною поділки поділяються на

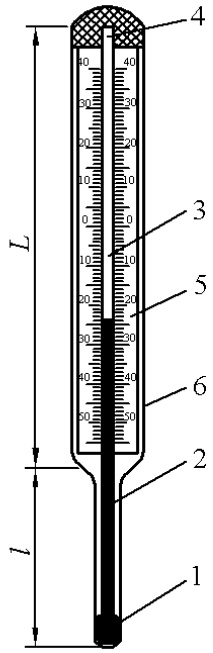


Рисунок 7.1 – Рідинний скляний термометр: 1 – скляний балон; 2 – термометрична речовина; 3 – капілярна трубка; 4 – резервуар з термометричною речовиною; 5 – шкала термометра; 6 – захисний скляний корпус; *l* – робоча частина

Таблиця 7.3 – Термометричні речовини для скляних термометрів

Назва	Формула	Коеф. видимого об'ємного розширення, γ, *град*$^{-1}$	Межі застосування, °С	
			нижня	верхня
Метиловий спирт	CH_3OH	0,00115	– 80	+80
Етиловий спирт	C_2H_5OH	0,00103	– 80	+80
Керосин	–	0,00093	0	+300
Петролейний ефір	–	0,00140	– 120	+20
Пентан (технічний)	–	0,00170	– 190	+20
Толуол	$C_6H_5CH_3$	0,00107	– 80	+100
Амальгама талія	–	0,00016	– 50	+20
Галій	Ga	–	–	+1200
Ртуть	Hg	0,00016	– 35	+600

чотири групи. Найбільш точні мають ціну поділки шкали 0,1°С та інтервал вимірювання 50°С, наприклад, від +150 до +200°С.

3. Рідинні (не ртутні) термометри випускаються у різному конструктивному виконанні, включаючи – з прикладною шкальною пластиною для вимірювання у діапазоні від –190 до +100°С.

4. Підвищеної точності та зразкові ртутні термометри з верхньою границею вимірювання 600°С і ціною поділки шкали – до 0,01°С.

5. Електроконтактні ртутні термометри з впаяними у капілярну трубку регульованими контактами з діапазоном від 0 до +300°С.

6. Спеціальні термометри, включно з максимальними (напр. медичними), мінімальними, метрологічними та іншого призначення.

Найбільш поширеною причиною виникнення похибок вимірювання є різна величина занурення робочої частини у вимірювальне середовище. Для виключення таких похибок вводиться поправка.

Повірка термометрів виконується у термостатах шляхом порівняння показів із показами зразкового приладу більш високого класу точності.

Допустимі похибки вимірювання технічних термометрів не повинні перевищувати однієї поділки шкали. Допустима похибка показів зразкових термометрів значно нижча.

Основна і обов'язкова температурна точка для повірки термометрів, якщо вона попадає у діапазон вимірювання, – потрійна точка води.

7.3.2 Біметалеві та дилатометричні термометри

Дія біметалевих та дилатометричних термометрів основана на термометричній властивості теплового розширення різних твердих тіл.

У біметалевих термометрах у якості чутливого елемента використовуються пластинки або стрічки, що складаються з двох шарів різнорідних металів, які характеризуються різними коефіцієнтами теплового розширення. Найчастіше використовують мідноцинковий сплав – латунь (70%Cu + 30%Zn) та сплав заліза з нікелем – інвар (64%Fe+36%Ni), з суттєво різними коефіцієнтами теплового розширення: близько 0,000019 град$^{-1}$ для латуні та 0,000001 град$^{-1}$ для інвару.

Чутливі елементи біметалевих термометрів переважно виконуються у формі спіралей, з'єднаних із стрілочним вказівником (рис. 7.2).

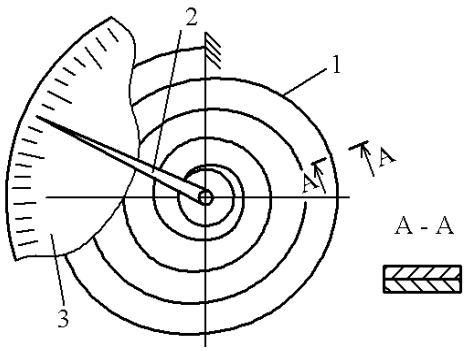


Рисунок 7.2 – Схема біметалевого термометра: 1 – біметалева спіраль; 2 – вказівник; 3 – шкала

Дилатометричні термометри як засоби вимірювання температури майже не застосовують. Їх використовують переважно в якості термореле та дискретних регуляторів температури (рис. 7.3). Такі ж регулятори будуються і на біметалевих елементах.

Чутливий елемент дилатометричного регулятора складається з металевої трубки 1 і кварцової або фарфорової вставки 2. Важільна передача 3 пропорційно збільшує різницю розширення трубки і вставки та змінює стан контактної групи 4.

Дилатометричні регулятори типу ТУДЕ оснащені задавачами температури спрацювання. У них можна також змінювати зону нечутливості.

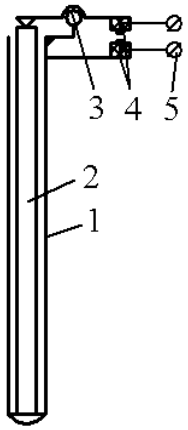


Рисунок 7.3 – Схема дилатометричного регулятора: 1 – трубка (латунь); 2 – вставка (кварц); 3 – важільна передача; 4 – ізольовані контакти; 5 – електричний вихід

7.3.3 Манометричні термометри

Дія манометричних термометрів основана на використанні залежності тиску речовини за постійного об’єму від температури.

Манометричний термометр складається з термобалона 1, капілярної трубки 2 та манометричної частини 3-7 (рис. 7.4). Вся система приладу – термобалон, капілярна трубка, манометрична пружина, заповнені робочою речовиною. Термобалон встановлюють в зону вимірювання температури. Від нагріву термобалона тиск робочої речовини всередині замкнутої системи збільшується. Збільшення тиску сприймається манометричною трубкою-пружиною, яка через передатний механізм діє на стрілку відлікового пристрою.

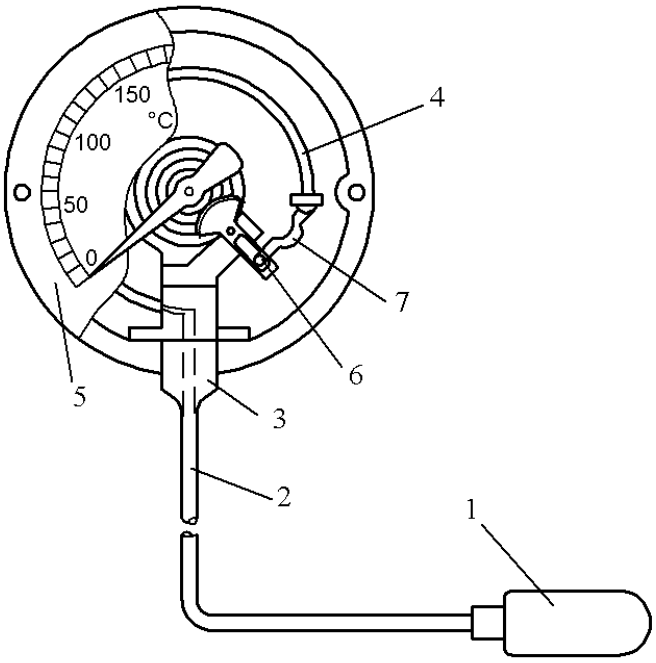


Рисунок 7.4 – Манометричний термометр з трубчатою пружиною: 1 – термобалон; 2 – капілярна трубка; 3 – утримувач; 4 – манометрична трубка (пружина); 5 – шкала; 6 – поводок; 7 – біметалевий компенсатор

Термобалон виготовляється з корозійностійкої сталі, а капіляр – з мідної або стальної трубки з внутрішнім діаметром 0,15-0, 5 мм. Капіляр може мати довжину від 1 до 60 м. Клас точності приладів – 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Манометричні термометри підрозділяють на три основних види:

1. Рідинні, у яких вся вимірювальна система – термобалон, манометр і з'єднувальний капіляр заповнені рідиною.

2. Конденсаційні, у яких термобалон заповнений частково рідиною з низькою температурою кипіння і частково – її насиченими парами, а з'єднувальний капіляр і манометр – насиченими парами, або частіше, спеціальною передавальною рідиною.

3. Газові, у яких вся вимірювальна система – термобалон, манометр та капіляр заповнені інертним газом.

За будовою манометричні термометри всіх типів аналогічні. Вони бувають показуючими, самописними та з контактним виходом. У контактних приладах вмонтовані електричні ізольовані контакти та механізм зміщення контактних груп у межах діапазону вимірювання. У момент досягнення температурою заданого значення спрацьовують електричні контакти.

У газових термометрах у якості робочої речовини використовують азот. Початковий тиск у системі залежить від діапазону вимірювання і складає від 0,98 до 4,9 МПа. Чим вища температура, тим менший тиск і навпаки. Діапазон вимірювання: від – 160°С до +600°С.

У рідинних термометрах використовують органічні рідини: метиловий спирт або ксилол $C_6H_4(CH_3)_2$ для вимірювань у діапазоні температур від –80°С до 320°С. Початковий тиск у термосистемі – 1,47-1,96 МПа.

У конденсаційних термометрах найбільше поширення отримали робочі речовини, приведені у таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 – Термометричні речовини для конденсаційних манометричних термометрів

Назва	Формула	Межі застосування	
		нижня	верхня
Хлор-метил	CH_3Cl	–25	+75
Хлор-етил	C_2H_5Cl	0	120
Ацетон	C_3H_6O	+60	180
Бензол	C_6H_6	+80	250
Ртуть	Hg	350	500

У якості передатної рідини, що заповнює капіляр і манометр конденсаційних термометрів найчастіше застосовують гліцерин (пропантріоль) у суміші зі спиртом або водою.

Шкали конденсаційних термометрів мають суттєву нерівномірність через нелінійність відношення між температурою кипіння і відповідним тиском. Робоча частина шкали розташована на ділянці 2/3 від верхньої межі вимірювання.

7.4 Термоелектричні термометри

7.4.1 Термоелектричний ефект

В основу вимірювання температури термоелектричними термометрами покладено термоелектричний ефект, який полягає у тому, що в замкнутому колі термоелектричного перетворювача (термопари), який складається з двох різнорідних провідників виникає електричний струм, якщо хоча б два місця з'єднання провідників мають різні температури. Спай (з'єднання), що має температуру t, називається робочим, а спай, що має постійну температуру t_o, – вільним (рис. 7.5).

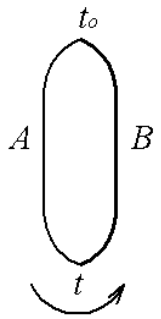


Рисунок 7.5 – Термоелектричне коло з двох різнорідних провідників

Провідники A та B називаються термоелектродами. Термоелектричний ефект пояснюється наявністю у металі вільних електронів, кількість яких в одиниці об'єму різна для різних металів.

У термоелектричному колі, складеному з двох різнорідних провідників A та B, виникає чотири різних термоелектрорушійних сили (термо-е.р.с.): дві термо-е.р.с. у місцях спаю провідників A та B, термо-е.р.с. на кінці провідника A і термо-е.р.с. на кінці провідника B.

Враховуючи обидва чинники, що визначають сумарну термо-е.р.с. замкнутого кола з двох провідників A та B, спаї яких нагріті до температур t та t_o, і, прямуючи колом у напрямку проти годинникової стрілки, отримаємо:

$$E_{AB}(tt_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0), \qquad (7.4)$$

де $E_{AB}(tt_0)$ – сумарна термо-е.р.с., що визначається дією обох чинників;

$e_{AB}(t)$ та $e_{BA}(t_0)$ – термо-е.р.с. викликані контактною різницею потенціалів та різницею температур кінців провідників A та B.

Якщо температура спаїв однакова, то термо-е.р.с. у колі рівна нулю, так як у обох випадках виникають термо-е.р.с., рівні за величиною та протилежно направлені. Відповідно, для $t = t_o$: $E_{AB}(t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BA}(t_0) = 0$, звідки $e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$. Підставивши ці значення у (7.4), отримаємо:

$$E_{AB}(tt_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0), \tag{7.5}$$

з чого випливає, що термо-е.р.с. є складною функцією двох змінних величин t та t_o, тобто температур обох спаїв.

Підтримуючи температуру одного із спаїв постійною, наприклад, t_o=const, отримаємо:

$$E_{AB}(tt_0) = f(t). \tag{7.6}$$

Якщо для даного термоелектричного перетворювача (ТЕП) експериментально, шляхом градуювання, знайдена залежність (7.6), то вимірювання температури зводиться до визначення термо-е.р.с. термометра.

Для включення вимірювального приладу необхідно розірвати електричне коло. Розрив можна виконати у спаї з температурою t_o (рис. 7.6, а) або в одному з термоелектродів (рис. 7.6, б).

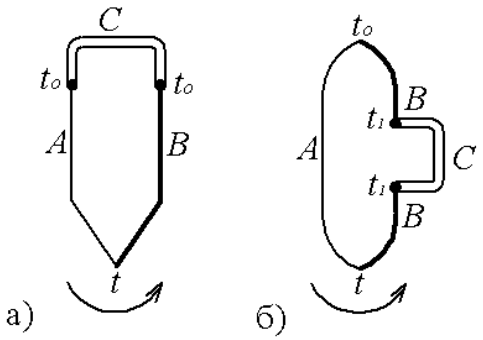


Рисунок 7.6 – Коло з третім провідником C, включеним: у спай ТЕП (а); у термоелектрод ТЕП (б)

Термо-е.р.с., яка розвивається ТЕП для обох схем однакова, якщо температури t та t_o і температури кінців провідника C також однакові. Термо-е.р.с. термометра не змінюється від введення третього провідника і відповідає рівнянню (7.6). На практиці найчастіше використовується схема, показана на рис. 7.6, а.

7.4.2 Термоелектричні перетворювачі – термопари

Існує велика кількість матеріалів у чистому вигляді і в комбінаціях, які можна використовувати як термоелектроди.

Термометричні властивості термопар прийнято порівнювати з нормальним термоелектродом, матеріалом для якого служить чиста платина. Всі матеріали за термоелектродними властивостями поділяють на позитивні та негативні. Позитивні – у яких в парі з платиною струм у гарячішому кінці за температури $t > t_o$ протікає від платини до цього матеріалу, а негативними – у яких струм протікає у зворотному напрямку.

В таблиці 7.5. приведено значення термо-е.р.с. для деяких чистих металів, металевих сплавів та інших матеріалів у парі з платиною за температури t = 100°С і вільних кінців t_o=0°С.

Таблиця 7.5 – Термоелектричні властивості матеріалів у парі з платиною (t = 100°С, t_o=0°С)

Назва	Склад (приблизний)	Термо-е.р.с.
залізо	практично чисте	+1,80
мідь	практично чиста	+0,75
нікель	практично чистий	– 1,49
срібло	практично чисте	+0,72
золото	практично чисте	+0,75
платинородій	90%Pt+10%Rh	+0,64
константан	60%Cu+40%Ni	– 3,35
копель	56%Cu+44%Ni	– 4,05
ніхром	(75-88)%Ni+(10-20)%Cr+(2-5)%Fe	+(1,6-2,4)
алюмель	94,5%Ni+2%Al+2%Mn+1%Si+0,5%Co	– 1,25
хромель	90,5%Ni+9,5%Cr	+2,90
кремній	–	+44,8

Як видно з таблиці 7.5 незначна зміна вмісту компонент у сплавах може суттєво змінити термо-е.р.с. (наприклад, константан і копель).

До термоелектронних матеріалів, призначених для виготовлення термоелектричних термометрів, висувається ряд вимог: жаростійкість та механічна міцність; хімічна інертність; термоелектрична однорідність; стабільність і відновлюваність термоелектричної характеристики; однозначна, бажано близька до лінійної, залежність термо-е.р.с. від температури; висока чутливість. На практиці підбирають два матеріали, які утворюють термопару, наділену певними конкретними термоелектричними властивостями. З’єднані між собою кінці термопари, які поміщуються у контрольне середовище, називаються робочим спаєм. Кінці, що знаходяться в зовнішньому середовищі, до яких під’єднуються провідники від вимірювального приладу, називаються вільними кінцями.

Для забезпечення взаємозамінності було прийнято стандарти на термопари масового виготовлення (таблиця 7.6).

Таблиця 7.6 – Стандартні технічні термопари

Позначення		Матеріал термоелектродів	Межі використання,°С		
термо-пар	градуювання		нижня	верхня	
				трива-ла	тимча-сова
ТПП	ПП-1	патинородій (10% родія – платина)	– 20	1300	1600
ТПР	ПР-30/6	патинородій (30% родія) – платинородій (6% родія)	300	1600	1800
ТХА	ХА	хромель – алюмель	– 50	1000	1300
ТХК	ХК	хромель – копель	– 50	600	800
ТВР	ВР-5/20	вольфрам-реній (5% ренію) – вольфрам-реній (20% ренію)	800	1800	2300

Термопари ТПП поділяють на еталонні, зразкові та робочі. Еталонні служать для повірки зразкових ТЕП, зразкові – для робочих ТЕП. Ці термопари надійно працюють в нейтральному та окислювальному середовищі.

ТПП та ТПР виготовляють у вигляді дроту діаметром 0,5 або 1 мм, яку ізолюють фарфоровими бусами або трубками.

Термопари ТХА використовують для вимірювання температур до 1300°С. Вони стійкі проти окислення та корозії.

Термопари ТХК розвивають найбільшу термо-.е.р.с., що дозволяє виготовляти їх з вузьким діапазоном вимірювання, наприклад, 0-300°С.

ТХА і ТХК виготовляють з дроту діаметром 0,7-3,2 мм, які ізолюються керамічними бусами.

Термопари ТВР застосовують для вимірювання температур до 2300°С у нейтральному та відновлювальному середовищі, а також у вакуумі. Використовуються для визначення температури розплавлених металів.

Характеристики перетворення ТЕП деяких термопар хоча й близькі до лінійних (особливо ХА та ХК), та все ж є нелінійними. Градуювання термопар виконується за табличними значеннями, а функція перетворення називається нормалізованою статичною характеристикою (НСХ).

У деяких випадках використовуються нестандартні термопари: мідь – константанові (60% Cu+40% Ni), нікель – константанові, мідь – копелеві та залізо – копелеві.

У багатьох пристроях та різних вимірювальних приладах використовуються напівпровідникові ТЕП з термо-е.р.с., у 5-10 разів більшою ніж у ТЕП з металів та сплавів. Тут у якості термоелектродних матеріалів використовують сплави ZnSb та CdSb.

У випадку, якщо необхідно виміряти невелику різницю температур, застосовують диференціальні ТЕП, а якщо треба отримати велику термо-е.р.с. термобатареї – послідовно з’єднані декілька термопар (рис. 7.7).

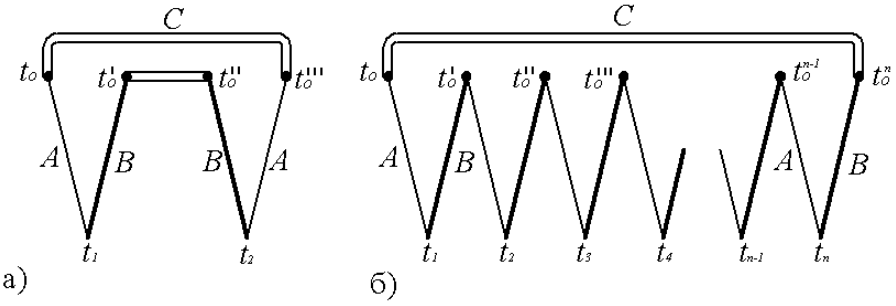


Рисунок 7.7 – Схема диференціального ТЕП (а) та термобатареї (б)

Сумарна термо-е.р.с. диференціального ТЕП:

$$E_{AB}(t_1 t_2) = e_{AB}(t_1) - e_{AB}(t_2). \qquad (7.7)$$

Термо-е.р.с. термобатареї, яка складається із *n* елементів:

$$E = [e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)]n = nE_{AB}(tt_0), \qquad (7.8)$$

де $E_{AB}(tt_0)$ – термо-е.р.с. одного термоелемента за температури t та t_o;

n – кількість термоелементів, з'єднаних послідовно.

Армовані термопари (рис. 7.8) називають термоелектричними термометрами. Конструктивне оформлення термоелектричних термометрів різноманітне і залежить головним чином від умов їх використання. Термоелектричні термометри випускаються у захисних корпусах різної форми, з різною тепловою інерцією і різною глибиною занурення в контрольне середовище.

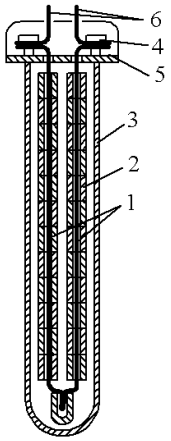


Рисунок 7.8 – Конструктивна схема термоелектричного термометра:
1 – термоелектроди; 2 – ізоляційні трубки; 3 – захисний чохол; 4 – з'єднувальні клеми; 5 – головка термометра; 6 – провідники до вимірювального приладу

7.4.3 Компенсація температури вільних кінців термопар

Якщо відомі контактні різниці потенціалів для різних температур одного кінця термопар, за умови, що інший кінець термопари має температуру 0°С, то результуюча термо-е.р.с. визначається з (7.6).

Якщо, навпаки, відома результуюча термо-е.р.с. для $t \neq 0$°С, то контактна різниця потенціалів:

$$e(t;0) = E(t;t_0) + e(t_0;0). \qquad (7.9)$$

Звідси, за градуювальними таблицями, визначивши поправку $e(t_0;0)$, можна знайти і температуру, яка визначається.

Температура t, якщо $t \neq 0$°С визначається наступним чином:

– вимірюється результуюча термо-е.р.с. $E(t;t_0) = E(t';0)$;

– визначається величина поправки $e(t_0;0)$ – термо-е.р.с., що відповідає температурі t_o вільного кінця термопари;

– за сумарною термо-е.р.с. $E(t;t_0) + e(t_0;0)$ за градуювальною таблицею визначається температура робочого кінця термопари.

Отже, щоб визначити температуру t необхідно знати температуру вільних кінців.

Для підключення вимірювального приладу до термопари часто необхідно використовувати подовжуючі провідники (рис. 7.9). Для того щоб не виникало похибки із-за різниці температур t_1 вільного кінця термопари та температури точки під'єднання приладу t_o, використовується компенсаційний провід.

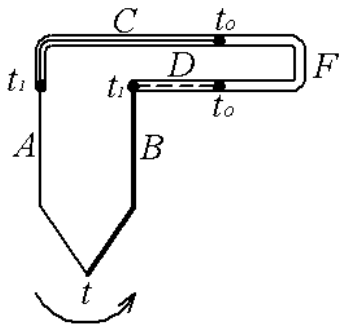


Рисунок 7.9 – Схема включення компенсаційних проводів *C* і *D* в коло термопари *A* і *B*

Компенсаційні проводи розвивають у з'єднаннях за невеликих температур (до 100-150°С) термо-е.р.с., рівну термо-е.р.с. термопари і є, по суті, продовженням її вільних кінців. Тільки термоелектроди із дорогих металів замінюють дешевшими компенсаційними проводами.

Компенсаційні проводи випускаються з жилами перерізом 0,2-2,5 мм^2, в різній ізоляції та з різним покриттям. Кожному матеріалу жил присвоєно певний колір обмотки або зовнішнього шару ізоляції. У деяких випадках під ізоляцією у проводі прокладається кольорова пізнавальна нитка.

Термопари типу ТПР, ТВР не потребують компенсації термо-е.р.с. вільних кінців, так як нижня межа вимірювання лежить значно вище температури у зоні під'єднання приладу.

У виробничих умовах для автоматичного введення поправки на температуру вільних кінців використовують спеціальні електричні схеми.

7.5 Прилади для вимірювання термоелектрорушійної сили

Для вимірювання температури за допомогою термопар застосовуються різні методи та прилади, які можуть вимірювати величину термо-е.р.с. на вільних кінцях термопари. На практиці застосовуються два методи вимірювання: прямий, у якому використовуються мілівольтметри, та компенсаційний, у якому використовуються прилади з потенціометричною схемою вимірювання. Для контролю температурних параметрів технологічних процесів все частіше використовуються цифрові прилади з цифровим дискретним відліком.

7.5.1 Магнітоелектричні мілівольтметри

У магнітоелектричних мілівольтметрах використовується дія магнітного поля постійного магніту на провідники, якими протікає електричний струм (рис. 7.10).

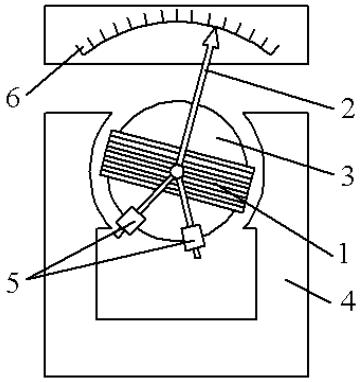


Рисунок 7.10 – Схема магнітоелектричного мілівольтметра: 1 – рамка з обмоткою; 2 – стрілка; 3 – нерухоме осердя; 4 – постійний магніт; 5 – вантажики-балансири; 6 – шкала

Рамка підключається до електричного кола, в якому виконується вимірювання термо-е.р.с. Підключення здійснюється або через спіральні пружинки, або через розтяжки, якщо рамка закріплена на них.

Магнітоелектричний момент, що заставляє обертатись рамку зі стрілкою, Н·м:

$$M_i = 2r \ln Bi, \tag{7.10}$$

де $2r$ – ширина рамки, м;

l – активна довжина рамки (та, що у магнітному полі), м;

n – кількість витків рамки;

B – магнітна індукція, $Н \cdot м^{-1} \cdot а^{-1}$;

i – сила струму у витках рамки, А.

Магнітоелектричному моменту протидіє пружний момент, що створюється спіральними пружинками або розтяжками, Н·м:

$$M_{пр} = \frac{EJ_x}{L}\varphi, \tag{7.11}$$

де E – модуль пружності матеріалу, $Н \cdot м^{-2}$;

J_x – геометрична характеристика перерізу пружного елемента, $м^4$;

L – розгорнута довжина пружного елемента, м;

φ – кут закручування (повороту рамки), рад.

Від зміни сили струму рамка буде обертатись до того часу, доки магнітоелектричний момент не стане рівним протидіючому: $M_i = M_{пр}$.

Схема підключення термопари до мілівольтметра показана на рисунку 7.11, де використано наступні позначення: $R_м$ – опір мілівольтметра; $R_П$ – опір з'єднувальних проводів; $R_у$ – зрівнюючий опір; $R_Д$ – додатковий опір. Така схема підключення мілівольтметра служить для зменшення похибки вимірювання. Опір $R_м$ завжди виконують досить великим, включаючи додаткову манганінову котушку $R_Д$ послідовно з рамкою.

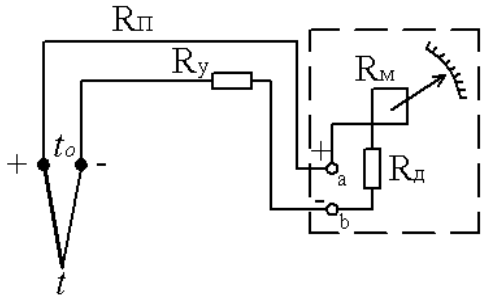


Рисунок 7.11 – Принципова схема термоелектричного термометра з використанням мілівольтметра

Точність показів дуже залежить від опору зовнішнього кола. Значення $R_{вн}$ повинне відповідати розрахунковому. Тому, опір зовнішнього кола після монтажу приладів підганяють з допомогою додаткової (зрівнюючої) манганінової котушки $R_у$. Розрахункова величина $R_{вн}$ у серійних приладах становить 0,6; 1,6; 5; 15; 25 Ом. Це значення опору наноситься на шкалу приладу.

7.5.2 Потенціометри

Принцип потенціометричного методу вимірювання оснований на врівноваженні (компенсації) термо-е.р.с., яка вимірюється, відомою різницею потенціалів, утвореною допоміжним джерелом струму.

Струм від допоміжного джерела E проходить колом, у яке між точками A і B включений компенсуючий змінний резистор R_{AB} (рис. 7.12). Різниця потенціалів між точкою A і будь-якою проміжною точкою D движка резистора R_{AB} буде пропорційною опору резистора R_{AD}. Послідовно з термопарою включений чутливий мілівольтметр НП з «0» посередині шкали, який називається нуль-прилад або нуль-індикатор. Термопара підключена таким чином, що струм на ділянці R_{AD} протікає у тому ж напрямку, що й від допоміжного джерела.

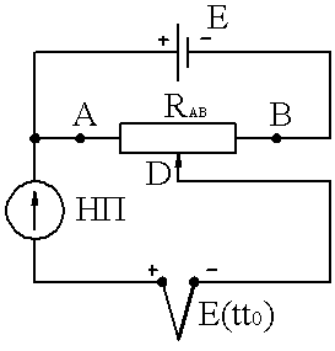


Рисунок 7.12 – Принципова схема потенціометра: НП – нуль-прилад; E – додаткове джерело живлення; $E(tt_0)$ – термопара; R_{AB} – змінний резистор

Пересуваючи контакт D можна знайти таке положення, за якого сила струму у колі буде рівна нулю – стрілка нуль-індикатора встановиться на відмітці «0».

Отже, термо-е.р.с. термопари визначається спадом напруги на ділянці змінного резистора і не залежить від опору НП та зовнішнього опору кола, а на

змінному резисторі R_{AB} можна встановлювати шкалу, проградуйовану в мілівольтах або в градусах.

Вимірювання термо-е.р.с. компенсаційним методом залежить від постійності струму в колі змінного резистора.

Для вимірювання термо-е.р.с. з постійним значенням сили струму у компенсаційному колі використовується схема з трьома джерелами напруги: термопари *T*, нормального елемента *НЕ* та гальванічного елемента *Е* і, відповідно, з трьома електричними колами (рис. 7.13).

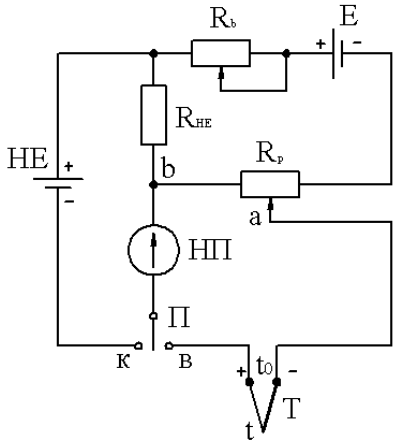


Рисунок 7.13 – Принципова схема потенціометра з постійною силою струму у компенсаційному колі

Нормальний елемент *НЕ* – це спеціальний прилад, який використовується у якості міри електрорушійної сили та характеризується великою постійністю е.р.с., яка розвивається у ньому (становить 1018,61 мВ). У сучасних приладах замість *НЕ* використовуються високостабілізовані джерела живлення.

Нормальний елемент *НЕ* призначається для встановлення постійного значення сили струму або для стандартизації струму у компенсаційному колі джерела *Е*. Нуль-індикатор може почергово підключатись або у коло *НЕ*, або у коло термопари *Т*. Стандартизація струму здійснюється компенсаційним методом. Для цього ставлять перемикач у положення «к», співставляючи напругу $E_{\text{не}}$ зі спадом напруги ΔU_{cn} на опорі $R_{\text{НЕ}}$. Якщо $E_{HE} \neq \Delta U_{cn}$, то, повертаючи движок R_b, доводять силу струму i до такого значення, за якого сила струму у колі нормального елемента буде рівна нулю.

Потім перемикач переводиться у положення «в» для вимірювання термо-е.р.с. термопари. Переміщують движок опору R_p, добиваючись відсутності струму у колі термопари. Це свідчить про те, що має місце повна компенсація е.р.с.

Величина термо-е.р.с. буде прямопропорційною опору ділянки *ab*:

$$E(tt_0) = iR_{ab} = \frac{E_{HE}}{R_{HE}} R_{ab} = kR_{ab}, \qquad (7.12)$$

де k = const.

Движок резистора R_p оснащується шкалою, проградуйованою у градусах. Такий проградуйований змінний резистор називається реохордом.

Компенсаційне вимірювання термо-е.р.с. термопари, що виконується потенціометрами, у порівнянні з прямим вимірюванням має дві основні переваги:

– відсутність у момент вимірювання струму в колі термопари;

– відсутність у вимірювальній схемі вимірювального приладу, бо гальванометр служить лише індикатором, що констатує відсутність струму.

7.5.3 Автоматичні потенціометри

Принципова відмінність автоматичних електронних потенціометрів – нуль-прилад замінений на електронний нуль-індикатор (рис. 7.14).

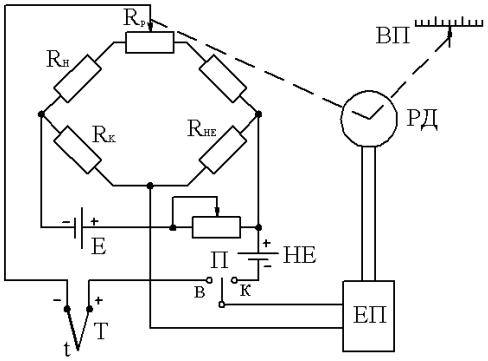


Рисунок 7.14 – Принципова схема електронного автоматичного потенціометра:
РД – реверсивний двигун; ЕП – електронний підсилювач;
ВП – відліковий пристрій

Вимірювальні схеми всіх автоматичних потенціометрів передбачають автоматичне введення поправки на температуру вільних кінців термопари. З цією метою у схему введено резистор $R_к$, виконаний з міді (або нікелю), який встановлюється у безпосередній близькості від клем підключення вільних кінців термопари або компенсаційних проводів. У промислових автоматичних вимірювальних потенціометрах (рис. 7.15) нормальний елемент не використовується.

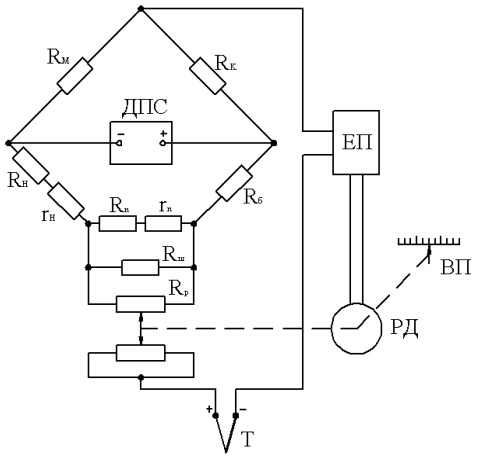


Рисунок 7.15 – Вимірювальна схема автоматичного електронного потенціометра зі стабілізованим джерелом живлення

У схему введено джерело стабілізованої напруги (ДПС), що забезпечує постійність струму у вимірювальній схемі.

У схемі (рис. 7.15) R_p – реохорд, паралельно якому, для забезпечення точного опору, включено шунт $R_{ш}$. Мідний резистор $R_{м}$ служить для компенсації температури вільних кінців термопари T. Постійне значення робочого струму у компенсаційному колі встановлюється за величиною спаду напруги на резисторі $R_{к}$.

Для зміни меж діапазону вимірювання автоматичного потенціометра служать резистори ($R_{н}$, $r_{н}$), ($R_{к}$, $r_{к}$) та $R_{б}$.

Джерело постійного струму ДПС включене у діагональ вимірювальної схеми. Призначення решти елементів таке ж, як і у попередній схемі.

Автоматичні потенціометри є промисловими приладами високого класу точності і бувають стрілочними з візуальним відліком та самописними з записом на круговій або стрічковій діаграмі.

7.6 Електричні термометри опору

7.6.1 Матеріали для виготовлення та будова термометрів опору

Вимірювання температури термометрами опору ґрунтується на властивості провідників та напівпровідників змінювати свій електричний опір за зміни їх температури. Отже, опір провідника є деякою функцією його температури $R = f(t)$.

Для виготовлення чутливих елементів серійних термометрів використовуються чисті метали. До цих металів висуваються вимоги:

– метал не повинен окислятись та вступати у хімічну реакцію з середовищем контролю;

– температурний коефіцієнт електричного опору металу $\alpha = \frac{1}{R}\frac{dR}{d\tau}$ повинен бути достатньо високим та незмінним; цей коефіцієнт прийнято визначати відношенням $\alpha_{0...100} = (R_{100} - R_0)/100R_0$, де R_0 та R_{100} – опір зразка матеріалу за температури 0 та 100°С відповідно;

– питомий електричний опір металу повинен бути достатньо високим;

– зі зміною температури опір повинен змінюватись лінійно або по плавній кривій без різких відхилень.

Цим вимогам найбільш повно відповідають платина, мідь, нікель та залізо (таблиця 7.7).

Таблиця 7.7 – Основні характеристики матеріалів для термометрів опору

Матеріал	Температурний коефіцієнт α, 1/°С	Питомий опір, ρ, Ом·мм^2/м	Діапазон практичного використання, °С
Платина	$3{,}9\cdot10^{-3}$	0,1	– 260 ÷ +750
Мідь	$4{,}26\cdot10^{-3}$	0,017	– 50 ÷ +180
Нікель	$(6{,}21\text{-}6{,}34)\cdot10^{-3}$	0,118-0,138	–
Залізо	$(6{,}25\text{-}6{,}57)\cdot10^{-3}$	0,055-0,061	–

Зміна опору платини виражається рівняннями:

– у діапазоні температур від 0 до +650°С:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + bt^2), \tag{7.13}$$

– у діапазоні від – 200 до 0°С:

$$R_t = R_0[1 + \alpha t + bt^2 + c(t - 100)t^3], \tag{7.14}$$

де *a, b, c* – постійні коефіцієнти, значення яких визначається під час градуювання термометра по точках кипіння кисню, води та сірки;

R_t, R_0 – опір платини за температури *t* та 0°С.

До переваг мідних термометрів ТСМ можна віднести: невисока вартість, простота отримання тонкого дроту в різній ізоляції, можливість отримання провідникової міді високої чистоти. Температурний коефіцієнт електричного опору провідникової міді лежить в межах від $4{,}2 \cdot 10^{-3}$ до $4{,}27 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$.

Зміна опору міді виражається рівнянням:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t). \tag{7.15}$$

Конструктивно термометри опору виготовляються у стандартних корпусах, а чутливі елементи (рис. 7.16) поміщаються у захисних гільзах корпусів.

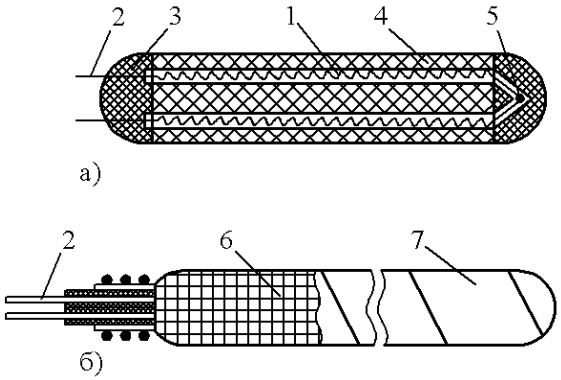


Рисунок 7.16 – Чутливі елементи платинового (а) та мідного (б) термометрів опору: 1 – платинова спіраль; 2 – виводи; 3 – термоцемент; 4 – керамічний каркас; 5 – з'єднання пайкою;6 – безіндукційна мідна намотка; 7 – захисна фторопластова плівка

Для виготовлення термометрів опору використовуються також напівпровідникові елементи – оксиду деяких металів. Суттєва перевага напівпровідників – великий температурний коефіцієнт температурного опору (від $3 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^{-2}$ 1/°С).

Залежність електричного опору напівпровідникового резистора від температури описується рівнянням:

$$R = A\exp(B/T) \tag{7.16}$$

або

$$\ln R = \ln A + B/T\,, \tag{7.17}$$

де A і B – постійні коефіцієнти, що залежать від фізичних властивостей матеріалу напівпровідника;

T – абсолютна температура терморезистора.

Для вимірювання температури найчастіше використовують напівпровідникові терморезистори типу ММТ-1, ММТ-4, КМТ-1, КМТ-4, у яких в робочих інтервалах температур опір змінюється за експоненціальним законом.

7.6.2 Логометри

Робота вторинних приладів для вимірювання температури, у випадку використання термометрів опору, зводиться до точного вимірювання активного електричного опору. Вимірювання опору на практиці виконується прямим методом – за допомогою логометрів, та нульовим методом або методом відхилення – за допомогою вимірювальних мостів.

Логометри – магнітоелектричні прилади, рухома частина яких складається з двох рамок, розташованих під деяким кутом (рис. 7.17) і поміщених у повітряний проміжок між полюсами постійного магніту і сердечником. Протидіючий момент у логометрів, як і обертовий, створюється електричним полем однієї з його рамок, що є характерною особливістю цих приладів. Тому струмопроводи до рамок логометра не повинні створювати механічного протидіючого моменту, і стрілка відлікового пристрою у відключеному приладі може займати довільне положення.

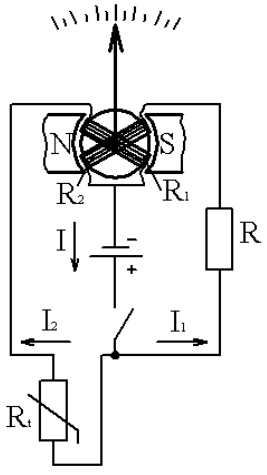


Рисунок 7.17 – Принципова схема логометра

Кут повороту такої рухомої системи є функцією відношення сили струму у обох рамках $\varphi = f(I_1 I_2)$. Обертові моменти рамок:

$$M_1 = c_1 B_1 I_1;\; M_2 = c_2 B_2 I_2\,. \tag{7.18}$$

На рисунку 7.18 подано принципову електричну схему логометра Л-64.

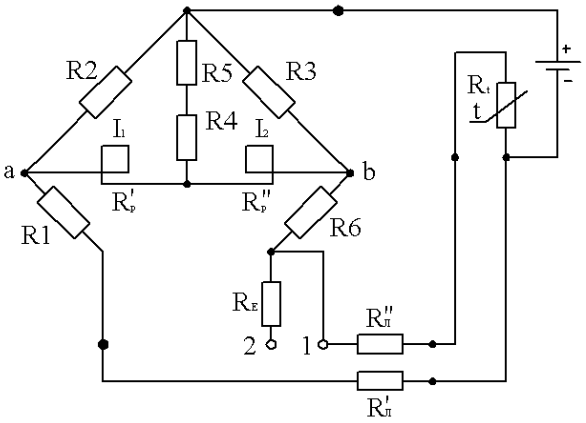


Рисунок 7.18 – Електрична схема логометра Л-64

Рамки логометра включені послідовно в діагональ моста, виконаного з постійних манганінових резисторів *R1, R2, R3, R6* та термометра опору R_t. Середня точка між рамками з'єднана через послідовно включені мідний резистор *R5* та манганіновий *R4* з вершиною моста, до якої підводиться один провід джерела живлення; другий провід під'єднується до протилежної вершини. Резистор *R4* служить для зміни кута відхилення рухомої системи, а *R5* – для температурної компенсації.

Розрахунковий зовнішній опір логометра 2,5 або 7,5 Ом. Підгонка зовнішнього опору $R_{Л}^{'}$ та $R_{Л}^{''}$ виконується роздільно для кожного проводу.

7.6.3 Мостові вимірювальні схеми

У якості вимірювальних приладів з термометрами опору використовують врівноважені мости та логометри, а з напівпровідниковими терморезисторами – неврівноважені мости. Врівноважені мости поділяються на лабораторні (неавтоматичні) та промислові (автоматичні). Автоматичні можуть бути показуючими, реєструючими та регулюючими.

Принципова схема врівноваженого моста постійного струму приведена на рисунку 7.19. Міст складається з двох резисторів *R1* та *R3* з постійними і рівними опорами, змінного резистора *R2* та термометра R_t.

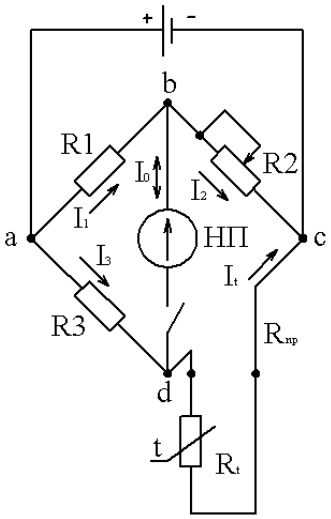


Рисунок 7.19 – Схема врівноваженого моста з термометром опору

До опору термометра додаються опори $2R_{пр}$ двох під'єднувальних проводів. У одну діагональ (*ac*) моста включене джерело постійного струму, в іншу (*bd*) – нуль-прилад НП.

У момент встановлення рівноваги моста, яка досягається переміщенням движка резистора *R2*, сила струму у діагоналі моста $I_0 = 0$. У цьому випадку потенціали на вершинах моста *b* та *d* рівні, струм від джерела живлення розділяється на два розгалуження I_1 та I_3, спад напруги на резисторах *R1* та *R3* однаковий, тобто:

$$R_1 I_1 = R_3 I_3, \tag{7.19}$$

а опір термометра буде визначатися як:

$$R_t = R_2 \frac{R_3}{R_1} - 2R_{пр}. \tag{7.20}$$

У випадку, коли коливання температури під'єднувальних проводів є значними, застосовується трьохпровідна систему під'єднання, яка полягає у тому, що одну з вершин моста переносять безпосередньо до головки термометра (рис. 7.20). У цьому випадку опір одного проводу $R_{пр}$ додається до опору R_t, а опір другого проводу – до змінного опору R_2.

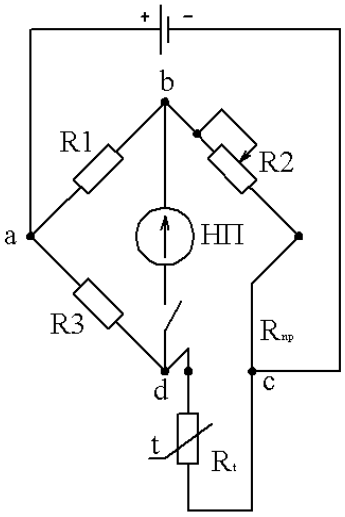


Рисунок 7.20 – Трьохпровідна схема включення термометра опору у вимірювальний міст

У автоматичних врівноважених мостах використовується вимірювальна схема чотириплечого моста. Движок змінного опора, який називається реохордом, переміщується автоматично, а не вручну. Ця схема, яка забезпечує високу точність вимірювання, дозволяє виконувати шкали моста односторонні, безнульові та двосторонні.

Як видно зі схеми (рис. 7.21), термометр опору підключається до моста за трипровідною схемою. У цьому випадку опір провідників, що служать для

під'єднання термометра до моста, розподіляється між двома суміжними плечами моста R_t та $R1$. Завдяки цьому досягається значне зниження значення додаткової похибки, викликаної можливою зміною опору під'єдувальних провідників внаслідок зміни температури оточуючого середовища.

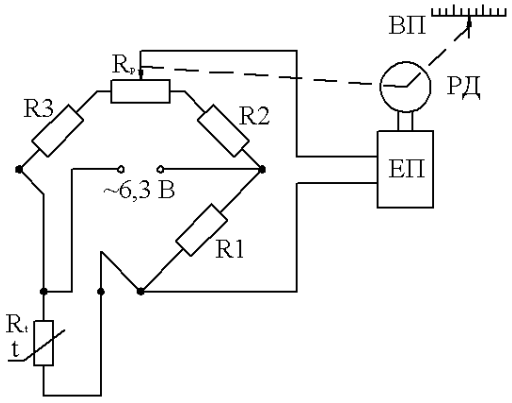


Рисунок 7.21 – Схема автоматичного врівноваженого моста на змінному струмі з трипровідним підключенням термометра опору

Номінальне сумарне значення опору проводів, які з'єднують термометр з мостом, встановлено рівним 5 Ом. Таким чином, опір кожного провідника, а відповідно, і спеціальних підгоночних резисторів, які включаються послідовно з провідниками, рівний 2,5 Ом з допустимим відхиленням від номіналу не більше ±0,01 Ом.

Резистори *R1, R2, R3* вимірювальної схеми з постійними опорами виконані з манганіну, а реохорд R_p – з манганіну або спеціального сплаву. Вимірювальна схема живиться змінним струмом напругою 6,3 В. Напруга розбалансу подається на вхід електронного підсилювача ЕП і підсилюється до величини, достатньої для приведення в дію реверсивного електродвигуна РД. Ротор двигуна, який обертається в ту або іншу сторону, через систему передач переміщує движок реохорда, врівноважуючи схему, а також переміщує стрілку відлікового пристрою ВП.

7.7 Пірометри випромінювання

7.7.1 Теоретичні основи безконтактного вимірювання температури

Принцип дії пірометрів випромінювання основується на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл. Основні переваги пірометрів:

– вимірювання виконується безконтактним методом;

– верхня межа вимірювання теоретично необмежена;

– є можливість вимірювання температури полум'я та високих температур газових потоків на великих швидкостях.

Променева енергія виділяється нагрітим тілом у вигляді хвиль різної довжини. За порівняно низьких температур (до 500°С) нагріте тіло випромінює інфрачервоні промені, які не сприймаються людським оком. З підвищенням температури зростає спектральна енергетична яскравість (СЕЯ), тобто

випромінювання певної довжини хвилі (яскравості), а також сумарне (інтегральне випромінювання). У відповідності до цих властивостей пірометри випромінювання поділяються на квазімонохроматичні, спектральних відношень та повного випромінювання.

Теоретично можна обґрунтувати лише явище випромінювання абсолютно чорного тіла, коефіцієнт випромінювання якого приймають рівним одиниці. Всі реальні фізичні тіла наділені властивістю відбивання частини променів і їх коефіцієнт випромінювання менше одиниці. Шкали пірометрів градуюють за випромінюванням абсолютно чорного тіла.

Для абсолютно чорного тіла СЕЯ описується рівнянням Віна:

$$E_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \tag{7.21}$$

де $E_{0\lambda}$ – СЕЯ абсолютно чорного тіла для хвилі довжиною λ;

T – абсолютна температура тіла, К;

C_1 і C_2 – константи випромінювання, числові значення яких залежать від прийнятої системи одиниць.

$$C_1 = 2\pi\hbar c^2, \tag{7.22}$$

де $\hbar$ – постійна Планка;

c – швидкість світла.

$$C_2 = N\hbar c / R, \tag{7.23}$$

де N – постійна Авогадро;

R – універсальна газова постійна.

Для температур вищих 3000 К СЕЯ абсолютно чорного тіла описується рівнянням Планка:

$$E_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}. \tag{7.24}$$

З підвищенням температури абсолютно чорного тіла область спектру, наділена максимальною енергією, зміщується у напрямку малих довжин хвиль (рис. 7.22). Це явище приводить до поступової зміни кольору тіла та зростання його яскравості. Кількість енергії, що випромінюється абсолютно чорним тілом, характеризується площею, обмеженою між віссю абсцис та кривою розподілу енергії по спектру.

Спектральний розподіл енергії випромінювання відбувається згідно з законом зміщення Віна: $\lambda_{max}T = b$, де λ_{max} – довжина хвилі, що відповідає максимальному випромінюванню за даної температури T; b = 2896 мкм·К – стала. Закон зміщення Віна, який отримується диференціюванням рівняння (7.24) по λ та прирівнюванням похідної нулю, може бути застосованим і до фізичних тіл.

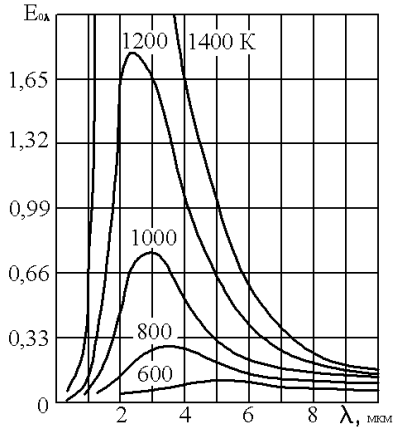


Рисунок 7.22 – Залежність спектральної енергетичної яскравості (СЕЯ) абсолютно чорного тіла $E_{0\lambda}$ від довжини хвилі λ

7.7.2 Квазімонохроматичні пірометри

Принцип дії квазімонохроматичних пірометрів оснований на порівнянні яскравості монохроматичного випромінювання двох тіл: еталонного та тіла, температуру якого вимірюють. У якості еталонного тіла використовується нитка лампи розжарення, яскравість випромінювання якої регулюється.

Найбільш поширеним приладом цієї групи є квазімонохроматичний (оптичний) пірометр з ниткою розжарення, яка зникає (рис. 7.23).

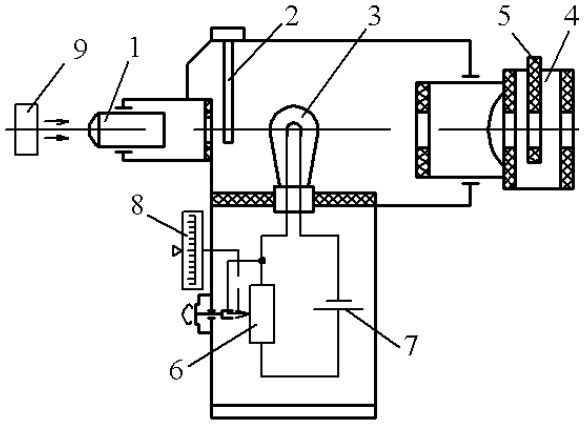


Рисунок 7.23 – Схема оптичного пірометра з ниткою, яка зникає: 1 – об’єктив; 2 – світлофільтр; 3 – лампа розжарення; 4 – окуляр; 5 – червоний світлофільтр; 6 – реостат; 7 – джерело струму; 8 – відліковий пристрій; 9 – об’єкт вимірювання

Пірометр складається з телескопічної трубки з об’єктивом 1 та окуляром 4. Всередині трубки у фокусі лінзи об’єктива знаходиться лампа розжарювання 3 з підковоподібною ниткою. Лампа живиться від джерела струму 7 через реостат 6. Движок реостата 6 механічно з’єднаний з обертовою шкалою 8 відлікового пристрою. Для отримання монохроматичного світла окуляр оснащено червоним світлофільтром 5, який пропускає промені тільки певної довжини хвилі. В об’єктиві розміщено сірий поглинаючий світлофільтр, що служить для розширення меж вимірювання.

Об’єктив та окуляр можуть переміщуватись вздовж осі, що дозволяє

отримати різке зображення розжареного тіла 9 та нитки. Після включення джерела струму, реостатом регулюється яскравість нитки до того моменту, доки середня її частина не зіллється з яскравістю об'єкта контролю – нитка стає невидимою на фоні розжареного тіла. За положенням шкали у цей час проводиться відлік температури тіла.

Стабільність показів пірометра з ниткою, яка зникає, залежить головним чином від постійності характеристик вимірювального приладу і лампи. Лампа з вольфрамовою ниткою протягом тривалого періоду зберігає властиву їй залежність яскравості нитки від сили струму, що через неї протікає, якщо температура не перевищує 1400°С. Нагрівання до температури вище 1400°С приводить до розпилення вольфрамової нитки та зміни її опору, а виділений вольфрам осідає на стінках колби лампи і утворює темний наліт.

Межі вимірювання підвищують введенням сірого світлофільтра, який з однаковою мірою поглинає енергію хвиль всіх довжин. Скло сірого світлофільтра вибирається такої оптичної густини, щоб за яскравісної температури випромінювача вище 1400°С нитка лампи розжарювалась до температури не вище 1400°С. У відповідності з цим мілівольтметр оснащують двома шкалами: верхньою – для вимірювання температур від 800 до 1400°С з виведеним сірим світлофільтром та нижньою – для температур вище 1300°С з введеним сірим світлофільтром.

7.7.3 Пірометри повного випромінювання та спектрального відношення

Пірометри повного випромінювання вимірюють температуру за потужністю випромінювання нагрітого тіла. У радіаційних пірометрах, як їх ще називають, використовується весь спектр випромінювання – промені всіх довжин хвиль, теоретично від $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$.

Умовна температура реального тіла, виміряна пірометром повного випромінювання, чисельно рівна температурі абсолютно чорного тіла, за якої інтегральне випромінювання обох тіл однакове.

Інтегральне випромінювання реального тіла, нагрітого до температури T:

$$E = \varepsilon C_0 (T/100)^4, \qquad (7.25)$$

де $\varepsilon = E / E_0$ – ступінь чорноти тіла для всіх довжин хвиль.

Інтегральне випромінювання абсолютно чорного тіла при співпадінні його температури з T_y:

$$E_0 = C_0 (T_y/100)^4. \qquad (7.26)$$

Порівнявши праві частини рівнянь (7.25) і (7.26) з врахуванням, що $E = E_0$, отримується формула для визначення дійсної температури реального тіла:

$$T = T_y \sqrt[4]{1/\varepsilon}, \qquad (7.27)$$

де T_y – умовна температура, виміряна пірометром повного випромінювання.

Пірометр оснащується оптичною системою (лінзою, дзеркалом), яка концентрує промені, що випромінюються нагрітим тілом, на теплоприймачі. Теплоприймач складається з мініатюрної термобатареї (з декількох термопар), термоопору або напівпровідникового терморезистора. Термобатарея промислового пірометра РАПИР (рис. 7.24) складається з десяти послідовно з'єднаних хромель-копелевих термоелектричних перетворювачів – термопар.

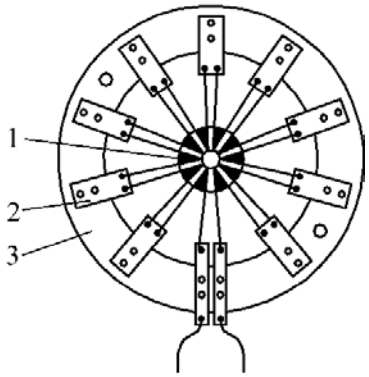


Рисунок 7.24 – Термобатарея пірометра РАПИР: 1 – робочий спай; 2 – контактна пластина; 3 – плата

Для збільшення теплосприймаючої поверхні робочі спаї 1 термопар, виконані у формі невеличких трикутників, зачорнені і наклеєні на тонку слюдяну пластинку. Вільні кінці термопар приварені до тонких металевих пластинок 2, закріплених на затиснутому між двома тонкими кільцями у корпусі телескопа, слюдяному кільці 3.

Пірометр з термобатареєю (рис. 7.25) складається з телескопа з лінзою 1 об'єктива та лінзою 2 окуляра. На шляху променів лінзи 1 встановлена діафрагма 3, а в фокусі об'єктиву – термоелектрична батарея 4. Перед окуляром поміщено кольорове скло 5 для захисту очей під час юстирування пірометра.

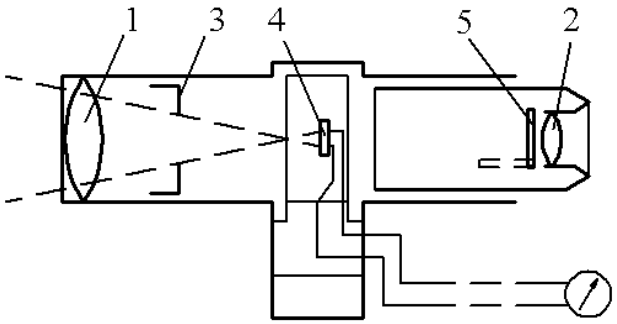


Рисунок 7.25 – Схема пірометра повного випромінювання з термобатареєю: 1 – об'єктив; 2 – окуляр; 3 – діафрагма; 4 – термоелектрична батарея; 5 – кольорове скло; 6 – фільтр

Пірометрами повного випромінювання, у яких в якості чутливого елемента використовуються термометри опору, можна вимірювати порівняно низькі температури, наприклад, від +20 до +100 °С.

Металевий корпус з приймачем випромінювання, оптичною системою та

іншими додатковими пристроями називається телескопом радіаційного пірометра. Практично оптична система радіаційних пірометрів дещо обмежує пропускання довгих хвиль. У скла коефіцієнт пропускання хвиль різко зменшується для довжини хвиль $\lambda \approx 2{,}5$ мкм, досягаючи нульового значення для $\lambda \geq 3$ мкм. Оптичний кварц нормально пропускає хвилі довжиною $\lambda \approx 3{,}5$ мкм, після чого коефіцієнт пропускання хвиль знижується, досягаючи нуля для $\lambda \geq 4{,}2$ мкм. Для вимірювання низьких температур, близьких до 100 °С, коли інтенсивність випромінювання коротких хвиль з довжиною $\lambda < 1{,}0 – 1{,}5$ мкм, стає дуже малою і інтегральне випромінювання визначається довгохвильовою частиною спектру, для оптичних систем використовуються інші матеріали, наприклад, синтетичний фтористий літій. Пластина з цього матеріалу товщиною 2 мм має межу пропускання $\lambda \approx 9$ мкм.

У якості вторинних вимірювальних приладів застосовують мілівольтметри, автоматичні потенціометри або врівноважені мости.

У пірометрах спектрального відношення (колірних) визначається відношення СЕЯ реального тіла у променях двох попередньо вибраних довжин хвиль, тобто, покази пірометра є функцією $f(E_{\lambda 1}/E_{\lambda 2})$. Це відношення для кожної температури різне, але достатньо однозначне.

У більшості випадків для реальних тіл криві $E_\lambda = f(\lambda)$ для різних температур повністю подібні кривим для абсолютно чорного тіла, тому практично не вимагається вводити поправки на неповноту випромінювання, що є основною перевагою колірного пірометра. Більша частина конструкцій колірних пірометрів основана на визначенні кольору тіла, температура якого вимірюється, за відношенням енергетичних яскравостей для двох довжин хвиль, не дуже близьких одна до одної у видимій частині спектру. Щоб уникнути залежності результатів вимірювання від суб'єктивних особливостей спостерігача, у колірних пірометрах для вимірювання відношення енергетичних яскравостей використовуються фотоелементи.

Випромінювання, що вимірюється, через захисне скло 1 (рис. 7.26) та об'єктив 2 попадає на фотоелемент 4. Між об'єктивом та фотоелементом встановлено обтюратор 3, що обертається синхронним двигуном. У дисковому обтюраторі виконано два отвори, які закриті світлофільтрами: один червоним *Ч*, інший – синім *С*. Фотоелемент поміщений у термостат.

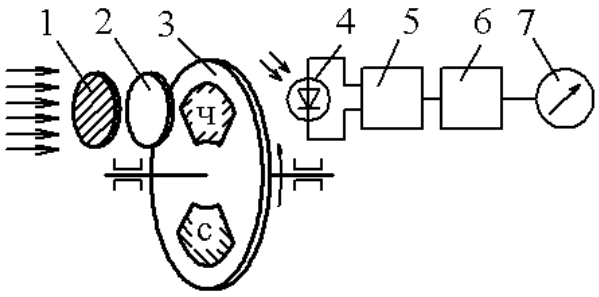


Рисунок 7.26 – Схема пірометра спектрального відношення з фотоелементом:
1 – захисне скло; 2 – об'єктив; 3 – обтюратор; 4 – фотоелемент; 5 – підсилювач;
6 – логарифмуючий пристрій; 7 – мілівольтметр

Електричний струм, напруга якого пропорційна відповідним СЕЯ, попередньо підсилюється підсилювачем 5 і перетворюється логарифмуючим пристроєм 6 у постійний струм: сила струму залежить від 1/*T*. Струм вимірюється мілівольтметром 7.

Межі вимірювання – від 1400 до 2500°С, основна похибка не перевищує ± 1 % від верхньої границі вимірювання.

Застосовуються також колірні пірометри з диференціальною вимірювальною схемою, з використанням двох фотоелементів.

7.8 Цифрові прилади для вимірювання температури

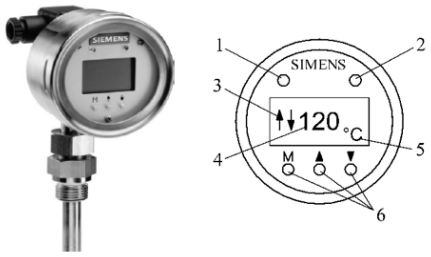
У сучасних умовах для вимірювання температури широко використовуються цифрові вимірювальні прилади. Ці прилади є переважно багатофункціональними, можуть використовуватись для вимірювання температури та інших фізичних величин. Можуть працювати у комплекті з термоелектричними перетворювачами, термометрами опору або сприймати уніфікований електричний сигнал. Часто використовуються для автоматизації різних технологічних процесів як регулятори. На виході можуть реалізовувати дво- та трипозиційне дискретне регулювання або ПІД-закон регулювання. Можна використовувати у комплекті з ПК – протокол MODBUS, інтерфейс RS232 або RS485. Прилади дозволяють архівування результатів вимірювання до 10-20 тисяч результатів.

Цифрові прилади використовуються як для контактних, так і безконтактних методів вимірювання температури.

Отримують широке застосування і цифрові прилади, які прийнято називати інтелектуальними давачами.

До таких інтелектуальних давачів останнього покоління відноситься вимірювальний перетворювач температури SITRANS TF2.

Прилад SITRANS TF2 (рис. 7.27) – це компактний вимірювальний перетворювач температури з цифровим дисплеєм та термометром опору Pt100. Призначення приладу – індикація та контроль температури, що вимірюється на технологічній лінії за місцем встановлення, а також дистанційна передача сигналу вимірювальної інформації на відстань.



а) б)

Рисунок 7.27 – Загальний вигляд (а) і передня панель (б) приладу TF2:
1 – зелений світлодіод; 2 – червоний світлодіод; 3 – індикація виходу за верхнє і нижнє граничне значення; 4 – індикація значення параметра; 5 – індикація одиниць вимірювання; 6 – клавіші управління

Вимірювальний перетворювач температури SITRANS TF2 об’єднує три компоненти в одному приладі:

– термометр опору Pt100 в захисній трубці із нержавіючої сталі;

– корпус із нержавіючої сталі з високим класом захисту;

– вбудований мікропроцесорний вимірювальний перетворювач з дисплеєм на рідких кристалах.

Діапазон вимірювання приладу – температура від –50 до +200°С.

Вихід: електричний уніфікований сигнал 4-20 мА.

Абсолютна похибка за температури навколишнього середовища в межах (23±5) °С складає: < ±(0,45°С + 0,2%) від верхнього значення встановленого діапазону. Час одного циклу вимірювання ≤100 мс.

Основні переваги приладу SITRANS TF2:

– висока точність вимірювання та індикація з роздільною здатністю 1/100 °С на всьому діапазоні вимірювання;

– можливість встановлення довільних діапазонів вимірювання в межах від –50 до +200°С;

– сигналізація (+/–) про перевищення заданого граничного значення температури на дисплеї, а також відповідного світлового індикатора.

Корпус SITRANS TF2 (ø80 мм) виготовлений із інструментальної сталі та оснащений захисним склом. У захисну трубу із інструментальної сталі з різьбовим з’єднанням вмонтований і термометр опору Pt100. У стандартному виконанні довжина захисної труби складає 170 мм.

На зворотній стороні корпусу розміщені клеми для підключення живлення вихідного навантаження, яке включається за схемою струмової петлі 4...20 мА.

На передній панелі корпусу під захисною скляною кришкою знаходиться п’ятирозрядний рідкокристалічний дисплей (рис. 7.27, б). Під дисплеєм розташовані три клавіші конфігурування SITRANS TF2. Вище над дисплеєм розташовані один зелений та один червоний світлодіоди для індикації виходу значення контрольованої температури за встановлені межі регулювання.

Первинний вимірювальний перетворювач Pt100, що поміщений у контрольне середовище, отримує живлення від стабілізованого джерела струму $I_к$ (рис. 7.28).

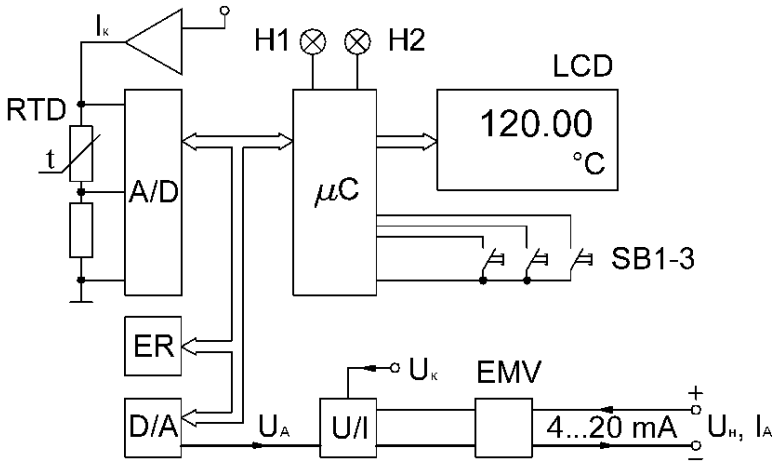


Рисунок 7.28 – Структурна схема перетворювача SITRANS TF2

Спад напруги на термоопорі Pt100 відповідає вимірюваній температурі. Аналого-цифровий перетворювач (A/D) перетворює спад напруги у цифровий сигнал. У мікроконтролері (μC) цифровий сигнал лінеаризується та відтворюється у числовій формі на дисплеї (LCD) у відповідності з вибраною одиницею вимірювання та встановленим діапазоном. Ці дані програмуються клавішами SB1-3 заздалегідь та зберігаються у блоці постійної пам'яті (ER). Вимірювальний перетворювач TF2 включає блоки і вузли (рис. 7.28):

Вхід: *RTD* – термометр опору Pt100; $I_к$ – стабілізоване джерело струму; *A/D* – аналого-цифровий перетворювач.

Вихід: *D/A* – цифро-аналоговий перетворювач;

U/I – перетворювач напруги в струм, який живиться від стабілізованого джерела напруги та перетворює напругу ЦАП в уніфікований вихідний сигнал по струму (4-20 мА);

EMV – вихідний каскад з захисними компонентами, який об'єднує струм живлення з уніфікованим вихідним сигналом по струму;

$U_н$ – джерело живлення перетворювача (+12 В);

I_A – уніфікований вихідний сигнал по струму (він же струм споживання).

Керування та індикація: *SB1-3* – конфігурування режимів роботи перетворювача; *LCD* – індикація вимірюваних величин з одиницями вимірювання; *H1* (зелений світлодіод) – індикація нормального режиму роботи; *H2* (червоний світлодіод) – індикація повідомлень про помилки та сигналізація про вихід параметру за встановлені межі.

Мікроконтролер: ER (EEPROM) – запам'ятовуючий пристрій для всіх параметрів; μC – функції обчислення та контролю мікроконтролера.

Основною перевагою перетворювача Sitrans TF2 є двопровідна схема живлення, у якій об'єднано коло живлення перетворювача з одночасною передачею по ньому сигналу вимірювальної інформації – вихідного уніфікованого аналогового сигналу струму 4-20 мА, який відповідає значенню вимірюваної температури. Тобто, для початкового значення вимірюваної температури схема перетворювача споживає струм 4 мА зі сталою напругою 12-30 В. У кінці діапазону вимірювання – перетворювач споживає струм 20 мА у тих же межах напруги живлення.

7.9 Тепловізори

Тепловізор (інфрачервона камера) – це оптико-електронний безконтактний вимірювальний прилад, що працює в інфрачервоній області електромагнітного спектра, який «переводить» у видиму область спектра власне теплове випромінювання фізичних об'єктів. Тепловізор може використовуватися як прилад для безконтактного вимірювання температури фізичних об'єктів і температурних полів.

Сучасний тепловізор має досить просту будову: об'єктив, тепловізійну матрицю (чутливий елемент) і електронний блок обробки сигналу. Матриця – це ґратка мініатюрних детекторів, що сприймає інфрачервоні сигнали і перетворює їх в електричні імпульси, які після підсилення перетворюються у відеосигнал.

Розмір фотоелектричних матриць у середньому 640×480 пікселів. Тепловізори поділяють на дві категорії: з матрицею з охолодженням і без охолодження. Простота і відносно невисока вартість тепловізорів без охолодження дозволили їх масове використання.

На рисунку 7.29 наведено узагальнену функціональну схему тепловізора з фокальною ІЧ-матрицею.

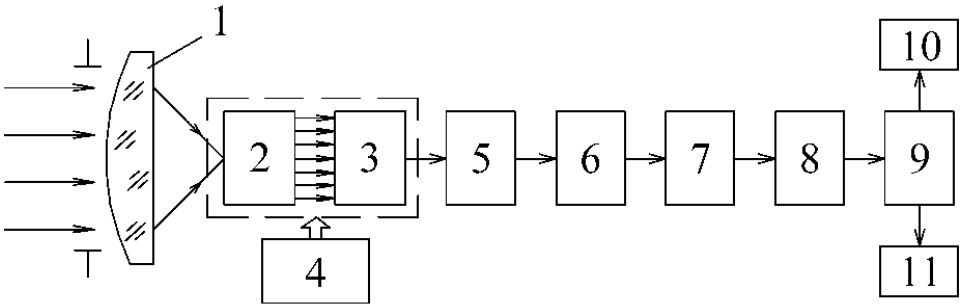


Рисунок 7.29 – Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною ІЧ-матрицею: 1 – оптична система; 2 – фокальна матриця із підсилювачами; 3 – мультиплексор; 4 – система охолодження; 5– коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів; 6 – аналого-цифровий перетворювач; 7 – цифровий коректор неоднорідності; 8 – коректор; 9 – формувач зображення; 10 – дисплей; 11 – цифровий вихід

Принцип роботи тепловізорів полягає в тому, що вони «бачать» не відбите інфрачервоне випромінювання, а власне випромінювання об’єктів. 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 передається на приймач – неохолоджувану матрицю термодетекторів. Далі отриманий відеосигнал за допомогою електронного блока вимірювання, реєстрації і математичної обробки оцифровується і відтворюється на екрані комп’ютера або дисплеї монітора.

Тобто фізична картина фотоефекта така: ІЧ-фотони, потрапляючи на поверхню напівпровідника зі звуженою зоною чутливості (HgCdTe, InSb), «переводять» носіїв заряду зі зв’язаного стану у вільний. Їх кількість пропорційна інтенсивності теплового випромінювання об’єкта. Матриця фотоелектричних детекторів, яка встановлена у тепловізорі, обов’язково повинна охолоджуватися, інакше власні теплові коливання ґратки напівпровідника викликають настільки інтенсивне вивільнення носіїв заряду, що на його фоні генерація носіїв ІЧ-випромінювання стає просто непомітною.

Головний елемент тепловізорів – об’єктив, для виготовлення якого використовується чистий германій. Вартість об’єктива становить приблизно 45% вартості всього приладу, ще 45% – матриця.

Контрольні питання

1. Які вимірювальні засоби використовуються для вимірювання температури?
2. На чому ґрунтується дія термометрів розширення?
3. Які робочі речовини застосовуються у манометричних термометрах?
4. Який фізичний ефект покладено в основу роботи термопар?
5. На чому ґрунтується потенціометричний метод вимірювання е.р.с.?
6. Що служить матеріалом для виготовлення термометрів опору?
7. Як поділяються і чим відрізняються пірометри випромінювання?

ТЕМА 8
ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ

План

8.1 Вимірювання лінійних та кутових розмірів
8.2 Вимірювання товщини шару покриття
8.3 Вимірювання відстаней між об’єктами

8.1 Вимірювання лінійних та кутових розмірів

У класифікації фізичних величин одну із груп становлять величини простору та часу, до яких відносяться геометричні розміри, час та параметри руху. Геометричні розміри – це широка група понять лінійних та кутових розмірів, площі та об’єму. У машино- та приладобудуванні лінійно-кутові вимірювання складають до 80% від всіх вимірювань.

Завдання вимірювань лінійних та кутових розмірів можна розділити на такі групи:

– вимірювання лінійних розмірів в діапазоні від часток мікрометра до декількох десятків метрів та кутових розмірів від 0,1″ до 360°. Найпоширенішими в цій групі є вимірювання розмірів деталей, відхилення розміру деталі від заданого значення, вимірювання параметрів шорсткості поверхонь, товщини покриття;

– вимірювання розмірів від часток метра до сотень метрів під час визначення рівня рідких та сипких матеріалів у різних технологічних ємкостях, резервуарах та свердловинах, рівня пального в баках транспортних засобів;

– визначення координат об’єктів та відстаней між об’єктами, зокрема і космічними, що знаходяться в межах від одиниць міліметрів до мільйонів кілометрів.

Основні електричні методи залежно від принципу вимірювального перетворення поділяються на електромеханічні, електрофізичні та спектрометричні або хвильові.

Електромеханічні методи поділяють на резистивні, індуктивні, ємнісні, оптоелектронні, обкочування тощо.

Електрофізичні методи основані на використанні відмінності в фізичних властивостях речовин, що знаходяться по різних сторонах межі вимірюваного розміру і поділяються на електромагнітні, ємнісні, кондуктометричні тощо. Найпоширенішими з електромагнітних є вихрострумові та резонансні методи.

Спектрометричні методи залежно від довжини хвилі випромінювання поділяються на звукові, ультразвукові, радіохвильові, надвисокочастотні, та оптичні або лазерні. Залежно від використовуваних явищ спектрометричні методи класифікуються на локаційні, інтерферометричні, рефрактометричні.

Електромеханічні методи широко застосовуються для вимірювань розмірів деталей та шорсткості поверхонь – мікрометри, профілометри, для вимірювання

рівнів рідин – поплавкові та буйкові рівнеміри. Для вимірювання відстаней пройдених транспортними засобами може використовуватись спосіб обкочування.

У контактних мікрометрах та профілометрах координати досліджуваного об’єкта попередньо перетворюються в лінійне переміщення голкоподібного щупа, а потім – в електричний сигнал за допомогою індуктивних, взаємоіндуктивних чи ємнісних перетворювачів.

Вимірювач малих розмірів на основі ємнісного перетворювача, який є елементом LC-контуру кварцового генератора показано на рисунку 8.1. Ємнісний перетворювач має нерухомий електрод 1, напилений на полірований скляний стержень, та нерухомий електрод 2, механічно з’єднаний з голкоподібним щупом, закріпленим в корпусі за допомогою плоских пружин.

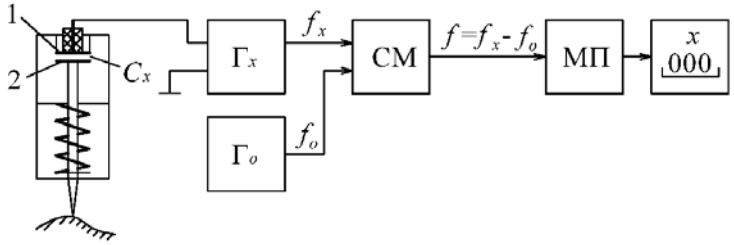


Рисунок 8.1 – Схема ємнісного профілометра

Ємнісний перетворювач високочастотним кабелем з’єднаний з кварцовим генератором Γ_x, вихідна частота f_x якого є функцією ємності C_x між рухомим та нерухомим електродами. Частота f_x та частота f_0 від опорного генератора частоти Γ_0 подаються на вхід суматора СМ, вихідна частота якого $f = f_x - f_0$. Після лінеаризації за допомогою мікропроцесора МП сигнал надходить на цифровий відліковий пристрій, проградуйований у мікрометрах.

Враховуючи, що:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}, \tag{8.1}$$

а для випадку, коли $C_x = C_{x0} + \Delta C = C_0 + \Delta C$:

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_x}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0\left(1+\frac{\Delta C}{C_0}\right)}}, \tag{8.2}$$

отримуємо:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\sqrt{L_0 C_0\left(1+\frac{\Delta C}{C_0}\right)}} - \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}\right) = -\frac{1}{2}\frac{\Delta C}{C_0} f_0 . \tag{8.3}$$

За наведеною схемою будуються мікрометри з порогом чутливості в частки мікрометра та діапазоном вимірювань 0,1-1 мм. Такий мікрометр використовується і для вимірювання шорсткості поверхонь.

У приладо- і машинобудуванні часто вимірюється не повне значення розміру, яке може досягати десятків сантиметрів і більше, а лише його відхилення від деякого заданого значення. Ці відхилення, як правило не перевищують часток міліметра, а отже такі мікрометри можуть успішно використовуватись для контролю розмірних відхилень.

Для вимірювання розмірів у діапазоні від часток міліметра до декількох сантиметрів може використовуватись штангенциркуль з ємнісним перетворювачем переміщень (рис. 8.2).

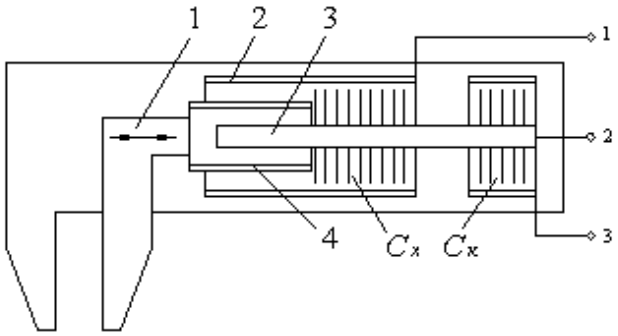


Рисунок 8.2 – Схема ємнісного штангенциркуля

На довгоходовому щупі 1 механічно закріплений екран 4, який взаємодіє з циліндричними елементами ємнісного перетворювача – зовнішнього 2 та внутрішнього 3. Від переміщення екрана 4 ємність C_x вимірювального конденсатора буде змінюватись пропорційно вимірюваному переміщенню. Для захисту від впливу завад передбачено компенсуючий конденсатор, ємність $C_к$ якого дорівнює ємності вимірювального конденсатора для $x = 0$. Одна з можливих вимірювальних схем такого штангенциркуля приведена на рисунку 8.3.

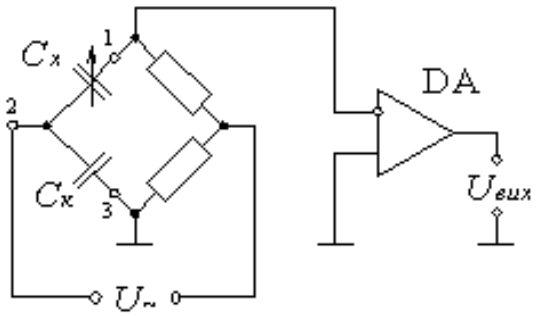


Рисунок 8.3 – Мостова вимірювальна схема з ємнісним перетворювачем

8.2 Вимірювання товщини шару покриття

Для вимірювання товщини шару покриття та товщини тонких листових виробів застосовують електрофізичні методи перетворення. Всі методи можуть бути розділені на дві групи: з руйнуванням покриття та без його руйнування. До

неруйнівного контролю відносяться вихрострумові, індуктивні, магнітометричні, радіаційні, індукційні, ємнісні методи.

За способом перетворення розрізняють параметричні та генераторні вихрострумові перетворювачі. До генераторних можна віднести індуктивні, а до генераторних – взаємоіндуктивні перетворювачі. На практиці, для вимірювання товщини покриття, використовується частотний спосіб отримання інформації. Вимірювальна котушка вмикається в LC-контур генератора високої частоти. Залежно від товщини покриття змінюється індуктивність котушки і тим самим частота f_x вимірювального автогенератора, значення якої розраховується як

$$f_x = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{C_0(L_0 - L_{вн})} - \frac{(R_0 + R_{вн})^2}{4(L_0 - L_{вн})^2}}, \qquad (8.4)$$

де C_0 – ємність резонансного контуру;

L_0 та R_0 – відповідно індуктивність та активний опір перетворювача за відсутності досліджуваного об'єкта;

$L_{вн}$ та $R_{вн}$ – відповідно внесені індуктивність та активний опір, зумовлені впливом вихрових струмів у досліджуваному об'єкті.

Для вимірювань товщини покриття на феромагнітних деталях може застосовуватись індуктивний метод. Повний електричний опір або індуктивність вимірювальної обмотки перетворювача (рис. 8.4) є функцією товщини покриття.

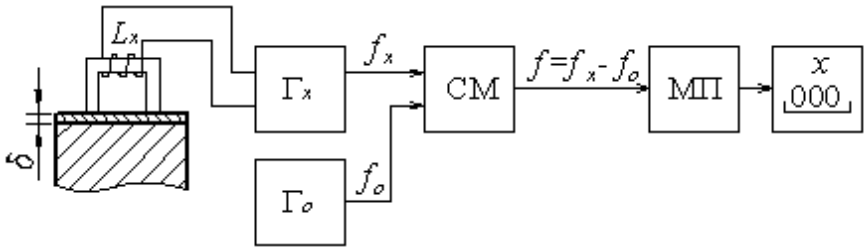


Рисунок 8.4 – Схема індуктивного товщиноміра

Котушка індуктивності L_x є елементом високочастотного генератора $Г_x$, вихідна частота f_x якого порівнюється з опорною частотою f_o, що генерується генератором опорної частоти $Г_o$. Частоти поступають на вхід суматора частот СМ, вихідна частота якого $f = f_x - f_o$. Після лінеаризації та оброблення з допомогою мікропроцесора МП сигнал подається на цифровий відліковий пристрій. Враховуючи, що магнітний опір магнітопроводу значно менший від магнітного опору покриття, еквівалентна індуктивність буде визначатися як:

$$L_{екв} \approx \frac{w^2 \mu_0 S_M}{2\delta}, \qquad (8.5)$$

де w – кількість витків вимірювальної обмотки;

S_M – площа перерізу магнітопроводу;

δ – товщина шару покриття.

Неруйнівний метод вимірювання може основуватись і на використанні взаємоіндуктивних перетворювачів, вихідним інформативним параметром яких є ЕРС (рис. 8.5).

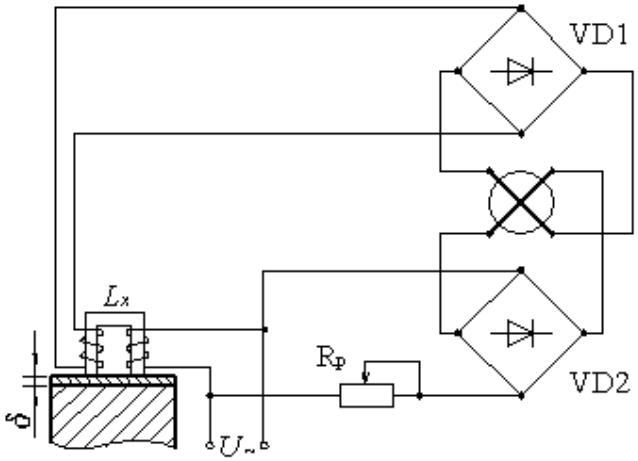


Рисунок 8.5 – Логометричний вимірювач товщини покриття

ЕРС, що наводиться у вимірювальній обмотці:

$$e_2 = \omega w_2 \Phi = \omega w_2 \frac{I_1 w_1}{Z_M} \approx \frac{\omega w_1 w_2 I_1}{2\delta / \mu_0 S}, \qquad (8.6)$$

де w_1 та w_2 – кількість витків намагнічувальної та вимірювальної обмоток;

I_1 – струм намагнічування;

S – площа перерізу магнітопроводу;

δ – товщина шару покриття;

Z_M – комплексний магнітний опір магнітопроводу.

$$Z_M = (R_M + R_{M\delta}) + jX_M \approx R_{M\delta}, \qquad (8.7)$$

де X_M та R_M – реактивна та активна складові комплексного опору магнітопроводу, що значно менші від магнітного опору покриття $R_{M\delta} = 2\delta / \mu_0 S$.

На базі такого методу побудовані прилади для вимірювання товщини покриття в межах до 3 мм з похибкою 10 – 15%.

8.3 Вимірювання відстаней між об’єктами

Найточнішими методами вимірювань відстаней між об’єктами є спектрометричні, зокрема локаційний метод, оснований на вимірюванні часу проходження вимірюваної відстані променем, швидкість якого відома і є незмінною.

Для реалізації локаційного методу можна використати всі види випромінювань, але найпоширенішими є методи та засоби оптичної, акустичної та радіолокації. У локаційних засобах джерело випромінювання і приймач

знаходяться на одній межі вимірювання, а на іншій – відбивач або межа об'єкта, відстань до якого визначається.

Радіолокаційний та оптичний локаційний методи застосовуються для вимірювань великих відстаней – від десятків до сотень метрів та багатьох мільйонів кілометрів.

Акустична локація використовується в твердих, рідких та газоподібних середовищах для вимірювань розмірів та відстаней від одиниць міліметрів до декількох кілометрів.

Швидкість проходження звукових та ультразвукових коливань в повітрі складає близько 333 м/с, в морській воді – 1500 м/с, в металах – від 3000 до 10000 м/с, що дозволяє використовувати акустичну локацію для вимірювань малих відстаней.

Є два основні способи реалізації локаційного методу: імпульсний та модуляційний або фазовий. Для першого використовується випромінювання у вигляді коротких імпульсів, для другого – безперервне модульоване випромінювання, фаза якого містить інформацію про вимірювану відстань.

В імпульсних локаторах (рис. 8.6) випромінювання у вигляді короткого імпульсу від джерела випромінювання – лазера 1 спрямовується до об'єкта 2, відстань до якого вимірюється.

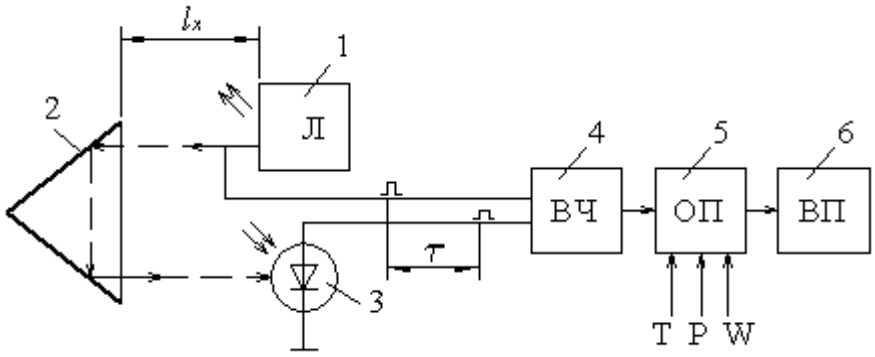


Рисунок 8.6 – Локаційний імпульсний метод визначення відстаней

Відбитий від об'єкта імпульс приймається оптоелектронним чутливим елементом 3. Інтервал часу τ, протягом якого імпульс проходить подвійну вимірювану відстань, визначається вимірювачем інтервалів часу 4. Якщо відома швидкість υ розповсюдження променя, вимірювана відстань l_x обчислюється за допомогою обчислювального пристрою 5 за формулою $l_x = \nu\tau/2$ і відтворюється відліковим пристроєм 6.

Швидкість розповсюдження електромагнітного випромінювання, зокрема оптичного, в повітряному середовищі визначається за формулою:

$$\nu = c/n, \tag{8.8}$$

де c = 299792458 м/с – швидкість світла у вакуумі;

n – показник заломлення світла в середовищі, що залежить від його температури, тиску, вологості.

У сучасних світловіддалемірах здійснюються допоміжні вимірювання температури, тиску, вологості в декількох точках вздовж лінії вимірювання і вводяться відповідні корективи в мікропроцесорі 5.

У модуляційних локаційних віддалемірах (рис. 8.7) використовується неперервне випромінювання лазера 1, модульоване за інтенсивністю синусоїдним сигналом з частотою $f_м$ від генератора 5.

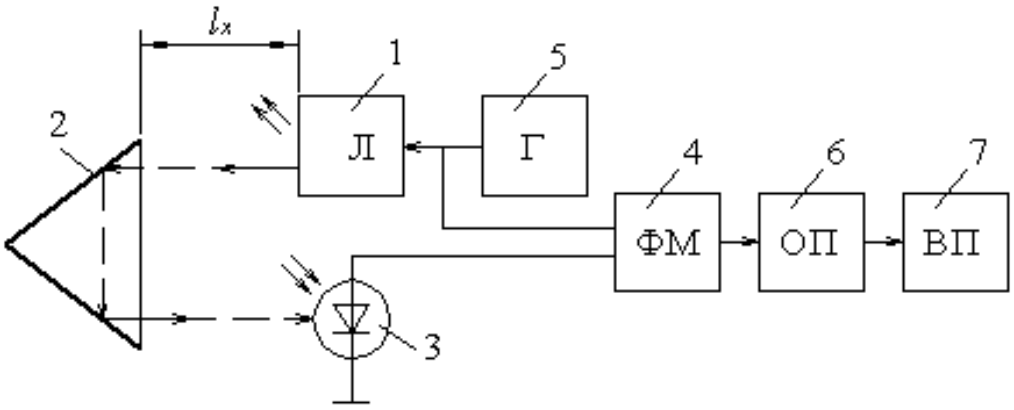


Рисунок 8.7 – Схема модуляційного локаційного віддалеміра

Як інформативний параметр для визначення часу проходження променем подвійної відстані l_x приймається кут фазового зсуву між напругою на виході приймача випромінювання 3 та модульованої напругою, який вимірюється фазометром 4 і здійснюється на частоті модуляції:

$$\varphi_\tau = 2\pi N + \Delta\varphi = \omega_м t_2 - \omega_м t_1 = 2\pi f_м (t_2 - t_1) = 2\pi f_м \tau\,, \qquad (8.9)$$

де $\omega_м t_1$ та $\omega_м t_2$ – фази коливань в моменти часу t_1 і t_2, відповідно;

N – повна кількість фазових циклів;

$\Delta\varphi$ – кут фазового зсуву в границях неповного фазового циклу.

Вимірювана відстань визначається в обчислювальному пристрої 6 за формулою:

$$l_x = \frac{\nu}{2}\tau = \frac{\nu}{2}\frac{\varphi_\tau}{2\pi f_м} = \frac{\nu}{2 f_м}\left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) = \frac{c}{2nf_м}\left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right). \qquad (8.10)$$

Отже, під час вимірювання фазовими локаційними віддалемірами відстаней, більших від половини довжини хвилі модуляційного сигналу, необхідно визначити повну кількість фазових циклів і кут фазового зсуву в границях неповного останнього циклу. Частота модуляції таких віддалемірів лежить в межах 10 … 100 МГц.

За допомогою оптичної локації та лазерів відстань від Землі до відбивачів, встановлених на Місяці, була визначена з точністю до 2 … 6 см, тобто з похибкою $\approx 2\cdot 10^{-8}$ %.

Контрольні питання

1. Які основні електричні методи застосовуються в техніці вимірювань лінійно-кутових розмірів?
2. Зміна якого параметра ємнісного перетворювача використовується у якості інформативного?
3. У чому полягає суть індуктивного методу для визначення товщини шару покриття?
4. Чому, якщо застосовуються ємнісні перетворювачі, то перевага надається мостовим вимірювальним схемам?
5. Які види випромінювань застосовуються для реалізації локаційного методу вимірювання віддалей?
6. Що є інформативним параметром у модуляційних локаційних віддалемірах?
7. Які чинники можуть впливати на точність вимірювання, якщо використовується локаційний імпульсний метод?

ТЕМА 9
ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

План

9.1 Загальні відомості та класифікація засобів вимірювання тиску.
9.2 Рідинні та поршневі манометри.
9.3 Пружні чутливі елементи деформаційних манометрів.
9.4 Деформаційні прилади для вимірювання тиску.
9.5 Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску.
9.6 Диференціальні манометри.

9.1 Загальні відомості та класифікація засобів вимірювання тиску

Тиск характеризує напружений стан рідин та газів і визначається відношенням нормальної сили, яка діє на поверхню, до площі цієї поверхні. Вважається, що нормальна сила рівномірно розподілена по поверхні:

$$p = \frac{N}{F}, \tag{9.1}$$

де p – тиск;
N – нормальна сила, яка діє на поверхню;
F – площа поверхні.

Тиск – одна з основних величин, яка характеризує термодинамічний стан речовин. Надзвичайно багатостороннє застосування тиску в науці, техніці і виробництві, а його вимірювання необхідне практично в будь-якій області науки і техніки.

Розрізняють наступні види тиску:

– абсолютний тиск – тиск, значення якого відраховується від тиску рівного нулю;

– атмосферний (барометричний) тиск – тиск повітряної оболонки Землі на її поверхню;

– надлишковий тиск – різниця тисків, один з яких, прийнятий за початок відліку, є атмосферним тиском:

$$p_н = p_{абс} - p_{атм}; \tag{9.2}$$

– вакуум – стан середовища, абсолютний тиск якого менший від атмосферного тиску.

У Міжнародній системі одиниць (СІ) за одиницю тиску прийнято паскаль (Па), що є відношенням сили в 1 ньютон (Н) до площі в 1 м^2:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

Розмір одиниці тиску Па є дуже маленьким, відповідає тиску стовпа води

висотою 0,1 мм. Тому на практиці використовують кілопаскалі (кПа), мегапаскалі (МПа), гектапаскалі (гПа): 1 кПа = $1 \cdot 10^3$ Па; 1 МПа = $1 \cdot 10^6$ Па; 1гПа = $1 \cdot 10^2$ Па.

Використовуються також позасистемні одиниці:

1 бар = $1 \cdot 10^5$ Па;

1 кГс/см^2 = 0,980665 $\cdot$ 10^5 Па $\approx$ 100 кПа, (кілограм-сила на квадратний сантиметр);

1 мм рт. ст. = 133,322 Па, (міліметр ртутного стовпа);

1 мм вод. ст. = 9,80665 Па, (міліметр водяного стовпа);

1 psi = 6, 89476 $\cdot$ 10^3 Па, (фунт-сила на квадратний дюйм);

1 Па = 0,102 мм вод. ст. = $7,5 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст.

Тиск, зважаючи на його фізичну суть, може бути визначений як шляхом безпосереднього вимірювання, так і опосередковано – вимірюванням іншої фізичної величини, функціонально пов’язаної з тиском.

У першому випадку вимірюваний тиск діє безпосередньо на чутливий елемент приладу, який передає інформацію про значення тиску на наступні ланки вимірювального кола для перетворення її у необхідну форму. Цей метод визначення тиску відноситься до прямих вимірювань і є найпоширенішим у техніці вимірювання тиску. На ньому основані принципи дії більшості манометрів та вимірювальних перетворювачів тиску.

Широкий діапазон вимірювання тисків – від часток Па до майже 10^{10} Па зумовив і велику різноманітність методів та засобів їх вимірювань. Значна частина методів основана на попередньому перетворенні тиску в механічне напруження, деформацію або переміщення за допомогою пружних перетворювальних елементів з наступним вимірюванням цих механічних величин.

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

– рідинні – вимірюваний тиск врівноважується тиском стовпа рідини відповідної висоти;

– деформаційні – вимірюваний тиск визначається за величиною деформації різних пружних чутливих елементів;

– вантажопоршневі – вимірюваний тиск врівноважується тиском, який створюється масою поршня та вантажів;

– електричні – дія яких основана на залежності електричних параметрів манометричного перетворювача від вимірюваного тиску.

За видом вимірюваного тиску розрізняють наступні основні прилади:

– манометри – прилади для вимірювання тиску або різниці тисків (загальна назва);

– барометри – для вимірювання барометричного тиску атмосферного повітря;

– манометри надлишкового тиску – для вимірювання надлишкового тиску, рівного різниці між абсолютним і атмосферним тиском;

– вакуумметри – для вимірювання тиску нижчого за атмосферний, рівного різниці між барометричним і абсолютним тиском;

– мановакуумметри – для вимірювання надлишкового і вакуумметричного

тиску;

– диференціальні манометри – для вимірювання різниці двох тисків, ні один з яких не є тиском оточуючого середовища.

Манометри, вакуумметри і диференціальні манометри, призначені для вимірювання невеликих надлишкових і вакуумметричних тисків або різниці тисків (до 40 кПа або 4000 мм вод. ст.) газових середовищ називають напоромірами, тягомірами або диференціальними тягонапоромірами.

9.2 Рідинні та поршневі манометри

9.2.1 Скляні рідинні манометри

Дія рідинних приладів основана на гідростатичному принципі, за якого вимірюваний тиск врівноважується тиском стовпа робочої рідини. В якості робочої рідини використовується дистильована вода, ртуть, спирт, трансформаторне мастило. Прилади підрозділяють на трубні, чашкові, дзвонові, кільцеві та поплавкові.

В U-подібному рідинному манометрі (рис. 9.1, а) значення вимірюваного тиску визначається висотою перепаду рівня рідини у трубці:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = H \cdot \rho \cdot g, \qquad (9.3)$$

де $H = h_1 + h_2$; ρ – густина робочої рідини; g – прискорення вільного падіння.

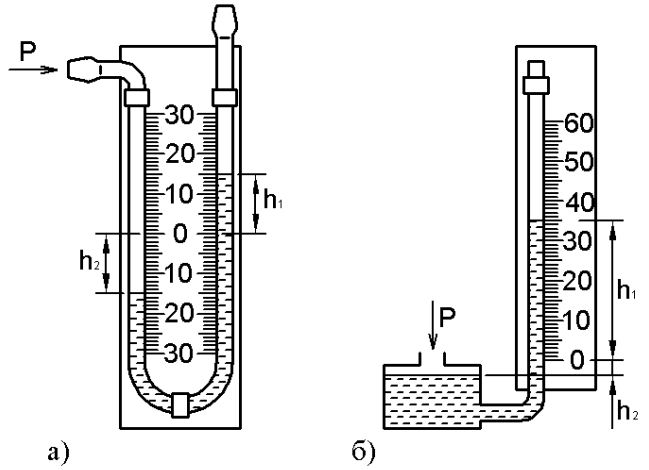


Рисунок 9.1 – Рідинні манометри: а) U-подібний; б) чашковий

Похибка показів в U-подібному манометрі може виникнути через неточність градуювання шкали (до 0,2-0,4 мм), вплив капілярних сил і поверхневого натягу (до 0,2 мм), відхилення від вертикального положення манометра і, головне, неточності відліку. Відлік необхідно виконувати по двох рівнях. Не можна відраховувати рівень в одній трубці і множити на два. Неоднаковий діаметр скляних трубок може призвести до великих додаткових похибок.

У чашковому манометрі (рис. 9.1, б) одна з частин виконана у вигляді

чашки діаметром D, який є значно більшим від діаметра трубки d. У цьому випадку перепад робочої рідини легко визначити за зміною висоти H:

$$H = h_1\left(1+\frac{f}{F}\right) = h_1\left(1+\frac{d^2}{D^2}\right), \tag{9.4}$$

де d, D – внутрішні діаметри трубки та чашки.

Перевага чашкового приладу, який ще називають однотрубним манометром, полягає у одному відліку положення меніску рідини у трубці. Але тут виникає похибка через зниження рівня рідини (h_2) у чашці, що змінює положення нуля шкали. Ця похибка буде прямо залежати від відношення площ трубки f і чашки F, та відповідно, діаметрів d і D. Площу перерізу трубки і чашки вибираються такими, щоб відношенням f/F можна було знехтувати. В основному для чашкових приладів вибирається відношення $f/F \leq 1/400$.

Для вимірювання невеликих тисків іноді застосовуються однотрубні манометри з похилою трубкою. У манометрах такого типу кут нахилу трубки α можна встановлювати довільно на декілька значень. Цим розширюються границі вимірювання таких манометрів.

Верхня межа вимірювання стандартних манометрів з похилою трубкою складає від 60 до 240 кГс/м^2 з приведеною похибкою від 0,6 до 1,0%.

9.2.2 Вантажопоршневі манометри

Для лабораторних вимірювань у якості зразкових засобів використовуються рідинні компенсаційні, вантажопоршневі та деформаційні манометри.

Принцип дії вантажопоршневих засобів вимірювання тиску заснований на врівноваженні зусилля, що створюється тиском, який вимірюється, на неущільненому поршні, силою ваги вантажу, що навантажує поршень. Неущільнений поршень – це поршень правильної циліндричної форми, поміщений у циліндр. Між стінками циліндра й поршня забезпечено рівномірний дуже незначний проміжок (1-5 мкм), заповнений робочою рідиною – трансформаторним або касторовим мастилом. У результаті поршень знаходиться у підвішеному стані і може проявляти на рідину тиск, зумовлений вагою поршня та вантажу, поміщеного на нього.

Поршневий манометр (рис. 9.2) складається з циліндричного поршня 1, притертого до циліндра 2 мінімально можливим проміжком. Якщо на нижній торець поршня діє вимірюваний тиск p, то для його врівноваження до поршня повинна бути прикладена сила P.

Рівняння рівноваги з врахуванням сили тертя на бокову поверхню поршня, що виникає від протікання рідини чи газу через кільцевий проміжок між поршнем і циліндром під дією вимірюваного тиску, має вигляд:

$$pF = P - T\,, \tag{9.5}$$

де F – геометрична площа перерізу поршня;

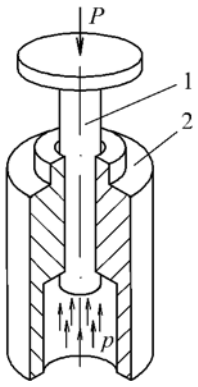


Рисунок 9.2 – Схема поршневого манометра

T – сила рідинного тертя на бокову поверхню поршня.

Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що сила рідинного тертя T пропорційна діючому тиску. Тому ефективна площа не залежить від тиску, а відповідно вимірюваний тиск прямо пропорційний силі, яка його врівноважує.

Найчастіше вимірюваний тиск врівноважується вагою вантажів, що є важливою перевагою з огляду на досягнення високої точності вимірювань. Рівняння вимірювань у цьому випадку має вигляд:

$$p = \frac{m \cdot g}{F_{еф}}, \tag{9.6}$$

де $F_{еф} = F + T / p$ – ефективна (приведена) площа поршня.

На рисунку 9.3 показано схему установки з вантажопоршневим манометром, оснащеним простим поршнем. Установка включає вантажопоршневий манометр I та гідравлічний прес II. Вантажопоршневий манометр – це посудина циліндричної форми 1, заповнена робочою рідиною. У внутрішній порожнині циліндра розташовано поршень 2 з вантажоутримуючою тарілкою 6.

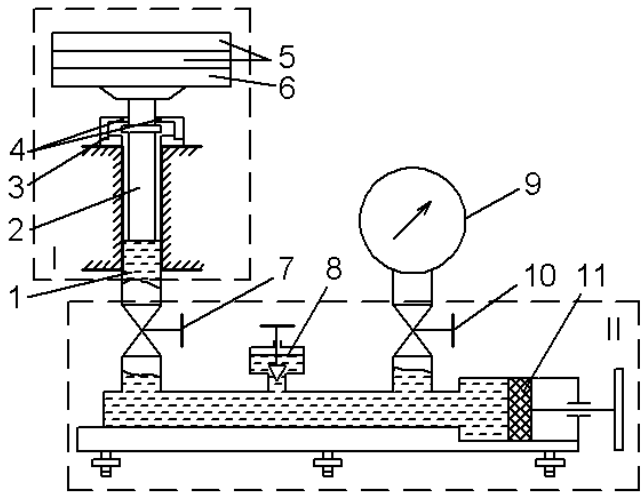


Рисунок 9.3 – Схема установки з вантажопоршневим манометром

Гідропрес складається з поршня 11, що має манжетне ущільнення. Внутрішня порожнина преса з'єднується з вантажопоршневим манометром І і приладом, який повіряється 9, через канали, що перекриваються вентилями 7 і 10. Для заповнення гідравлічної системи робочою рідиною передбачено бачок 8 з запірним вентилем.

Під час вимірювання тиску P, що створюється гідропресом, вантажоутримуючу тарілку навантажують вантажами 5 до того моменту, доки поршень 2 не прийде в стан рівноваги. Про досягнення рівноваги судять по співпадінні рисок 4 на поршні і обмежувачі ходу 3 поршня. В стані рівноваги поршня буде справедливою рівність:

$$P = \frac{m_p + m_в}{F_{пр}}(1 - \rho_п \rho_в)g, \qquad (9.7)$$

де m_p, $m_в$ – маса поршня та вантажів;

$\rho_п$, $\rho_в$ – густина повітря і матеріалу вантажів;

$F_{пр}$ – приведена площа поршня.

На практиці $F_{пр}$ визначається експериментально і є основним метрологічним параметром вантажопоршневих манометрів. Приведена площа поршня – 0,5 см^2. Класи точності вантажопоршневих манометрів з простим поршнем – 0,02; 0,05; 0,2.

Найбільш важлива перевага поршневих манометрів полягає в тому, що вони безпосередньо відтворюють тиск за визначенням: тиск рівний силі, поділеній на площу поршня. Цей метод, як і метод врівноваження тиску стовпом рідини, є фундаментальним, тобто вимірювання тиску у кінцевому підсумку зводиться до вимірювання маси, довжини та часу.

9.3 Пружні чутливі елементи деформаційних манометрів

Висока точність, простота конструкції, надійність та невисока вартість – це основні фактори, які обумовлюють широке використання деформаційних приладів для вимірювання тиску в промисловості та в наукових дослідженнях. Ці прилади призначені для вимірювання надлишкового тиску рідин та газів.

Принцип дії деформаційних приладів ґрунтується на використанні пружної деформації чутливого елемента або сили, яка ним створюється.

Основні типи пружних чутливих елементів (рис. 9.4): мембрани, мембранні коробки, сильфони і трубчаті пружини.

Мембрана – це пружна пластина у формі диска, жорстко закріплена по контуру, прогин якої визначається тиском, що діє на неї (рис. 9.4, а).

Мембранна коробка складається з двох гофрованих мембран, які герметично з'єднані по зовнішньому контуру, що суттєво збільшує її прогин під дією тиску (рис. 9.4, б).

Сильфон має форму тонкостінного циліндра, бокова поверхня якого гофрована з метою збільшення його видовження під дією тиску (рис. 9.4, в).

Для великої глибини витягування гофр сильфона стає ідентичним батареї послідовно з'єднаних мембранних коробок.

Трубчата пружина – це сплюснута тонкостінна трубка, яка зігнута за формою кільцевої дуги і під дією тиску розгинається, а її вільний кінець переміщується по дузі (рис. 9.4, г).

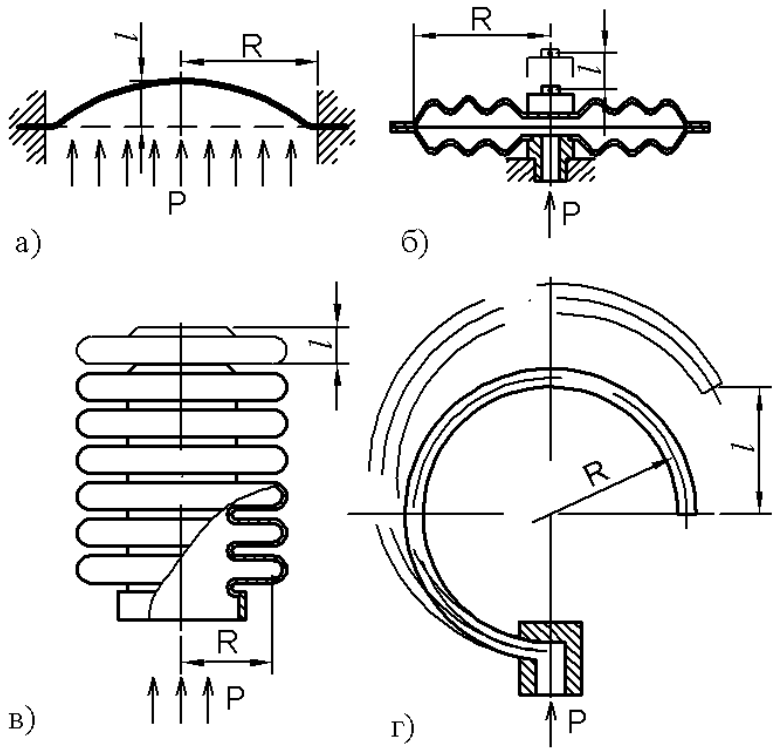


Рисунок 9.4 – Основні типи пружних чутливих елементів

Залежно від призначення та області застосування основні типи пружних чутливих елементів мають чисельні різновиди:

– мембрани – плоскі тонкостінні та товстостінні, з жорстким центром, гофровані, з попереднім натягом;

– мембранні коробки – зварні за грибковою схемою, складні, блоки мембранних коробок;

– сильфони – безшовні, зварні, одношарові та багатошарові;

– трубчаті пружини – одновиткові кругові, багатовиткові гвинтові та спіральні, S-подібні, виті, з ексцентричним внутрішнім отвором.

Основні метрологічні характеристики пружних чутливих елементів: пружна характеристика, нелінійність пружної характеристики, чутливість та жорсткість (штивність), гістерезис та постійність пружної характеристики.

Пружною характеристикою називається залежність між переміщенням заданої точки пружного елемента та тиском, що діє на нього $l = \varphi(p)$.

У залежності від типу та конструкції пружного чутливого елементу його пружна характеристика може бути лінійною або нелінійною. Під час проектування завжди прагнуть досягти лінійності характеристики, тому що у цьому випадку за допомогою простого передатного механізму можна отримати

шкалу, яка буде рівномірною на всьому діапазоні вимірювання. Але на практиці, особливо для точних вимірювань, завжди має місце відхилення реальної пружної характеристики від лінійності. Нелінійність пружної характеристики визначається за формулою: $\eta = \Delta l_{\max} / l_{\max}$, де l_{max} – переміщення заданої точки під дією максимального робочого тиску; Δl_{max} – найбільше відхилення характеристики від прямої лінії.

9.4 Деформаційні прилади для вимірювання тиску

Найпоширенішим типом манометрів, які використовуються у різних галузях техніки, є деформаційні манометри з одновитковою трубчатою пружиною (рис. 9.5). Їх часто називають технічними манометрами.

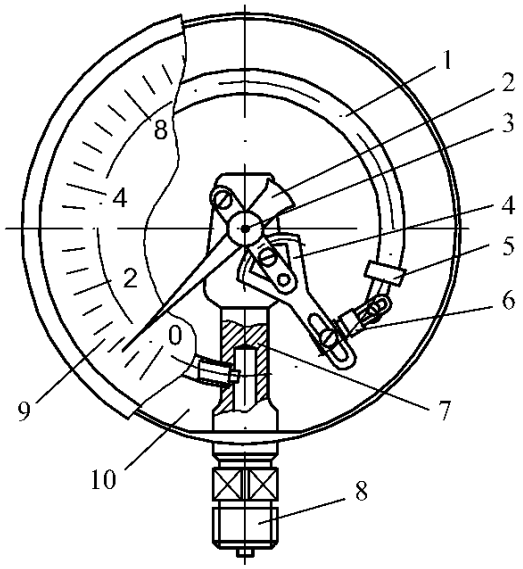


Рисунок 9.5 – Деформаційний манометр з одновитковою трубчатою пружиною

Вимірювальна система манометра складається з одновиткової трубчатої пружини 1, один кінець якої герметично з'єднаний з утримувачем 7, а на іншому кінці з наконечником 5 змонтована тяга 6, яка шарнірно з'єднана з зубчатим сегментом 4. Переміщення наконечника трубчатої пружини перетворюється в обертання осі стрілочного вказівника 2 з допомогою насадженої на вісь трубки 3 шестерні, що входить у зачеплення з зубчатим вінцем сегмента 4. Від зростання тиску, що подається всередину трубчатої пружини, вона розгинається, і стрілочний вказівник повертається за часовою стрілкою відносно шкали 9, нанесеної на циферблат, закріплений в корпусі 10 манометра. Для коректування кута повороту вказівника відносно шкали довжини пліч шарнірно-важільного механізму, що складається з тяги 6 й зубчатого сегмента 4, юстируються затискними гвинтами. До пристрою відбору тиску манометр під'єднується за допомогою штуцера 8.

Переміщення вільного кінця трубчатої пружини пропорційне тиску, що вимірюється, до певної межі $\Delta = kp$. При подальшому підвищенні тиску лінійна залежність порушується – деформація починає зростати швидше за збільшення

тиску. Граничний тиск, за якого ще зберігається лінійна залежність між переміщення кінця трубки і тиском, називається границею пропорційності трубки.

Механічні властивості трубки, тобто, границя пропорційності і величина переміщення вільного кінця, залежать від ряду чинників, з яких найважливішими є відношення осей перерізу приплюснутої (овальної) трубки, товщина її стінок, модуль пружності матеріалу і радіус дуги згину трубки.

Збільшення відношення осей за інших рівних умов підвищує чутливість та знизити границю пропорційності. Переважно відношення осей трубок, розрахованих на малий та середній тиск, знаходиться в межах $a/b = 1{,}5...4{,}5$. Збільшення товщини стінок різко підвищує границю пропорційності.

У манометрах високого тиску застосовують товстостінні із легованої сталі трубчаті пружини круглого перерізу з каналом, вісь якого зміщена відносно осі пружини в сторону центру кривизни (рис. 9.6). Завдяки ексцентричному каналу надлишковий тиск, що діє на заглушку вільного кінця трубки, створює момент, який викликає зменшення кривизни трубки і переміщення її вільного кінця.

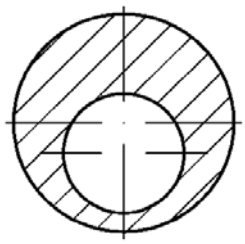


Рисунок 9.6 – Поперечний переріз трубчатої пружини манометра високого тиску

Залежно від необхідної точності вимірювань та призначення ступінь складності передатного механізму і габаритні розміри манометра можуть змінюватись у широких межах. Наприклад, для забезпечення необхідної точності відліку довжина шкали манометрів типу МО класу 0,15-0,25 складає не менше 500 мм для діаметра корпусу 250 мм, тоді як у манометрів класу 2,5-4 діаметр корпусу рівний 40-60 мм. Для усунення люфту у зубчатій передачі на осі стрілки монтуються натяжні спіральні пружинки. У найбільш точних приладах передбачено часткову компенсацію впливу температури. Суттєво також відрізняються вимоги щодо якості виготовлення деталей та матеріалів.

9.5 Деформаційні вимірювальні перетворювачі тиску

Деформаційні перетворювачі тиску, основані на методі прямого перетворення, розрізняють як за видом деформаційного чутливого елемента, так і за способом отримання сигналу вимірювальної інформації.

У техніці використовують індуктивні, ємнісні, п’єзоелектричні, тензорезистивні та деякі інші елементи перетворення.

9.5.1 Індуктивні вимірювальні перетворювачі тиску

Дія індуктивних перетворювачів (рис. 9.7) заснована на зміні індуктивності в залежності від деформації чутливого елементу.

Мембрана 1, яка сприймає тиск, є рухомим якорем електромагніта 2 з обмоткою 3. Під дією вимірюваного тиску мембрана 1 переміщується, що викликає зміну електричного опору індуктивного перетворювального елемента. Якщо знехтувати активним опором котушки, магнітними потоками розсіювання і втратами у сердечнику, індуктивність L перетворювального елемента можна визначити за формулою:

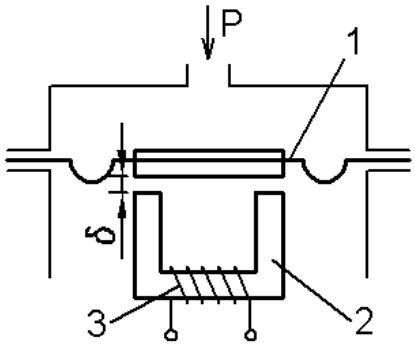


Рисунок 9.7 – Схема індуктивного перетворювача тиску: 1 – мембрана з якорем; 2 – електромагнітне осердя; 3 – індуктивна котушка

$$L = \frac{w^2}{l_c/(\mu_c S_c) + \delta/(\mu_0 S)}, \tag{9.8}$$

де w – кількість витків котушки;

l_c, S_c – довжина і площа поперечного перерізу феромагнітного осердя;

δ – довжина повітряного проміжку;

μ_c, μ_0 – магнітна проникність осердя і повітря;

S – площа поперечного перерізу повітряного проміжку.

У процесі вимірювання величина $l_c/(\mu_c S_c) << \delta/(\mu_0 S)$, тому вираз (9.8) можна подати як:

$$L = w^2 \mu_0 S / \delta. \tag{9.9}$$

Якщо величина деформації мембрани пропорційна до тиску, що вимірюється $\delta = k_1 P$, то отримуємо:

$$L = w^2 \mu_0 S / k_1 P. \tag{9.10}$$

Рівняння (9.10) є статичною характеристикою вимірювального перетворювача тиску індуктивного типу.

Вимірювання L виконується переважно мостами змінного струму або резонансними LC- контурами. Для тиску 0,5-1,0 МПа товщина мембрани складає 0,1-0,3 мм, а для тиску 20-30 МПа – 1,3 мм. Робочий хід мембрани складає соті долі міліметра.

За принципом дії індуктивні перетворювачі придатні для вимірювання будь-якого тиску: абсолютного, надлишкового або різниці тисків. Основними перевагами індуктивних перетворювачів є простота конструкції, хороші динамічні характеристики, високі вихідні сигнали, довгострокова стабільність.

Основна похибка індуктивних перетворювачів тиску ±(0,2-5)%, постійна часу – $(2,2\text{-}3)\cdot 10^{-4}$ с.

9.5.2 Диференціально-трансформаторні перетворювачі тиску

Вимірювальний перетворювач тиску диференціально-трансформаторного (ДТ) типу (рис. 9.8) включають деформаційний чутливий елемент 1 і ДТ-перетворювальний елемент 2.

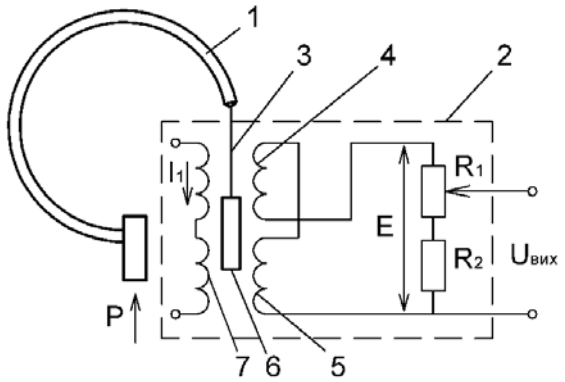


Рисунок 9.8 – Схема диференціально-трансформаторного перетворювача тиску

Перетворювальний елемент 2 – це циліндричний каркас із діелектрика, на якому розміщена котушка з первинною обмоткою 7, що складається з двох секцій, з'єднаних узгоджено, та двох секцій 4, 5 вторинної обмотки, з'єднаних зустрічно. Всередині каналу котушок розташовано рухоме осердя 6 з магнітом'ягкого матеріалу, зв'язане з трубчатою пружиною 1 тягою 3.

До виходу вторинної обмотки підключено подільник, який складається з регульованого R_1 і постійного R_2 резисторів. Подільник використовується для налаштування перетворювача на заданий діапазон. Шляхом зміни опору R_1 можна змінювати межі вимірювання на ±25%.

Формування вихідного сигналу ДТ-перетворювача здійснюється наступним чином. При протіканні по первинній обмотці струму I_1 виникають магнітні потоки, які пронизують обидві секції вторинної обмотки та індукує в них ЕРС e_1 і e_2. Значення цих ЕРС зв'язані з взаємними індуктивностями M_1 і M_2 між первинною обмоткою та кожною з секцій вторинної обмотки співвідношеннями:

$$e_1 = 2\pi f I_1 M_1; \qquad e_2 = 2\pi f I_1 M_2, \tag{9.11}$$

де f – частота струму I_1.

Для зустрічного включення обмоток секцій 4 і 5:

$$E = e_1 - e_2 = 2\pi f I_1 (M_1 - M_2) = 2\pi f I_1 M, \tag{9.12}$$

де M – взаємна індуктивність між первинною і вторинною обмотками.

Для уніфікованого ДТ-перетворювача, що має у вторинній обмотці резистори R_1 і R_2, вихідний сигнал $U_{вих}$ визначається взаємною індуктивністю $M_{вих}$ між первинною обмоткою і вихідними колами і може бути подана у вигляді:

$$U_{вих} = 2\pi f I_1 M_{вих}. \tag{9.13}$$

Величина $M_{вих}$ пов'язана з переміщенням δ осердя 6 залежністю:

$$M_{вих} = M_{\max} \frac{\delta}{\delta_{\max}}, \tag{9.14}$$

де $M_{\max}$ – максимальне значення взаємної індуктивності між первинною обмоткою і вихідними колами перетворювача, що відповідає максимальному $\delta_{\max}$ переміщенню осердя.

Розв'язуючи сумісно рівняння (9.13) і (9.14), отримаємо статичну характеристику уніфікованого ДТ-перетворювача:

$$U_{вих} = \frac{2\pi f I_1 M_{\max}}{\delta_{\max}} \cdot \delta. \tag{9.15}$$

У промислових ДТ-перетворювачах хід осердя складає 1,6, 2,5 або 4 мм. Перетворювачі мають уніфікований сигнал у вигляді напруги змінного струму, що змінюється в межах – 1÷ 0 ÷ +1 В. Знак «–» вказує на зміну фази сигналу. Цим значенням вихідного сигналу відповідають зміни взаємної індуктивності перетворювача в межах – 10÷ 0 ÷ 10 мГн.

Перетворювачі тиску ДТ-типу працюють в комплекті з диференціально-трансформаторними вторинними приладами. Клас точності ДТ-перетворювачів тиску 1,0 або 1,5.

9.5.3 Ємнісні вимірювальні перетворювачі тиску

У ємнісних перетворювачах використовується явище зміни електричної ємності від деформації чутливого елемента. Електростатичний (ємнісний) перетворювач (рис. 9.9) складається з двох електродів у формі плоских пластин, розташованих паралельно одна відносно другої, які утворюють конденсатор.

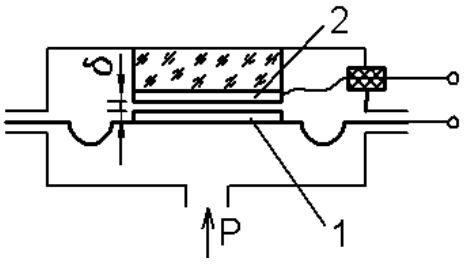


Рисунок 9.9 – Схема ємнісного перетворювача тиску: 1 – металева мембрана з однією пластиною конденсатора; 2 – нерухома пластина конденсатора на ізолюючій підкладці

Якщо одна з пластин має можливість переміщуватись, то електрична ємність C перетворювача обернено пропорційна віддалі між пластинами:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{\delta}, \tag{9.16}$$

де S – площа перекриття пластин;

ε – діелектрична проникність середовища між пластинами;

δ – віддаль між пластинами.

Якщо ємнісний перетворювач підключити до джерела змінного струму, то через нього буде протікати струм силою:

$$I = \omega \cdot C \cdot U_m \cdot \cos \omega t, \tag{9.17}$$

де U_m – напруга змінного струму;

$\omega = 2\pi f$ – кругова частота.

Як і у індуктивних перетворювачах, залежність між ємністю і переміщенням має нелінійний характер (гіпербола). Для зменшення нелінійності, якщо вимірюються невеликі переміщення (від 1 мкм до 1 мм), переважно застосовуються диференціальні ємнісні перетворювачі (рис. 9.10).

Пластина 2 закріплена на мембрані 4, величина зміщення якої буде залежати від знаку і різниці тисків P_1 і P_2. Пластини 1 і 3 нерухомо закріплені на ізоляторах. Від переміщення пластини 2 ємність між пластинами 1 і 2 збільшується, а між пластинами 2 і 3 – зменшується або навпаки.

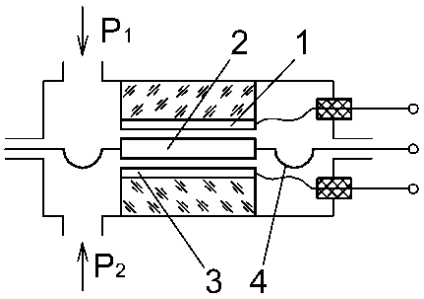


Рисунок 9.10 – Схема диференціального ємнісного перетворювача:
1, 3 – нерухомі пластини; 2 – рухома пластина; 4 – мембрана

Диференціальні ємнісні перетворювачі відрізняються високою чутливістю (до 500 в/мм), незначними похибками та простотою конструкції, особливо у вимірюванні різниці тисків. Залежність електричного комплексного опору перетворювача від переміщення мембрани практично лінійна.

9.5.4 П’єзоелектричні та тензорезисторні перетворювачі тиску

Дія п’єзоелектричних манометрів базується на використанні явища п’єзоефекту – виникненні на поверхнях пластини різнойменних зарядів від її стискання. П’єзоелектричні манометри мають високі динамічні характеристики, а тому широко використовуються для вимірювання швидкоплинних процесів.

Тензорезисторні перетворювачі тиску (манометри опору) містять

деформаційний чутливий елемент у вигляді мембрани, на яку наклеюють або напилюють тензорезистори, у яких виникає тензоефект – зміна електричного опору від деформації тензорезисту. Принципова відмінність тензорезистивного методу вимірювання тиску полягає у тому, що мірою тиску є не величина переміщення точки пружного чутливого елемента, а деформація поверхні цього елемента.

Тензорезистори умовно поділяють на основні групи: дротяні, фольгові, плівкові та напівпровідникові. У провідникових перетворювачах застосовується манганін або константан, а у напівпровідникових – кремній або германій. Застосування мембрани з сапфіру або кремнію дозволяє відмовитись від наклеювання тензорезисторів.

У якості вимірювальної схеми використовуються мостові вимірювальні схеми, у якій тензорезистори включаються у всі чотири плеча.

Цифровий манометр «Diptron 2» (Німеччина) призначений для вимірювання тиску з похибкою не більше 0,05%. Манометр (рис. 9.11, а) складається з сильфона 1, який перетворює вимірюваний тиск у зусилля, яке за допомогою стержня 2 згинає пружну балку 4.

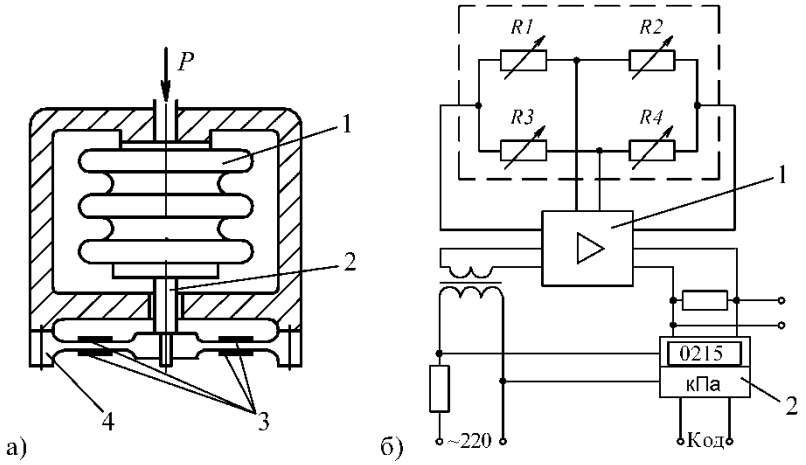


Рисунок 9.11 – Цифровий манометр «Diptron 2»:
а) конструкція перетворювача; б) схема електрична

Пропорційна тиску деформація сприймається тензорезисторами 3, включеними у мостову схему, два з яких працюють на розтяг, і два – на стискання. Підсилювачем 1 (рис. 9.11, б) вихідний сигнал підсилюється та після перетворення поступає на цифрове табло 2. Одночасно виконується перетворення в аналоговий та кодовий вихідні сигнали.

9.6 Диференціальні манометри

Диференціальні манометри використовуються у різних галузях промисловості для вимірювання перепаду тиску, витрат рідин та газів за перепадом тиску на звужуючому пристрої і рівня рідин, які знаходяться під атмосферним, надлишковим або вакуумметричним тиском. Крім цього, деякі типи

дифманометрів використовуються у якості тягомірів, напоромірів та тягонапоромірів.

Диференціальні манометри служать для вимірювання різниці тисків, а тому мають два входи. Дифманометри випускаються декількох класів точності: 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 і градуюються за номінальним перепадом тиску ΔP. Вони можуть мати відліковий пристрій – прилади для вимірювання витрат і не мати відлікового пристрою – вимірювальні перетворювачі.

За конструкцією поділяються на рідинні, у яких перепад тиску врівноважується відповідним стовпом рідини, та деформаційні, у яких врівноваження здійснюється за рахунок деформації пружних елементів. Рідинні дифманометри підрозділяють на поплавкові, дзвонові і кільцеві, а деформаційні – на мембранні і сильфонні.

Рідинні поплавкові дифманометри виготовляються за типом рідинних чашкових приладів, у чашці якого розміщено поплавок, з'єднаний системою важелів з відліковим механізмом. Дзвонові та кільцеві дифманометри, як морально застарілі, практично не використовуються. Основним недоліком рідинних дифманометрів є обов'язкова наявність робочої рідини у приладі, і як наслідок, велика інерційність показів, невеликі робочі частоти, можливість втрати частини робочої рідини тощо. Тому у сучасній вимірювальній техніці використовуються диференціальні манометри з пружними чутливими елементами і електричним виходом.

Дифманометри типу ДМ (рис. 9.12) оснащені уніфікованим лінійним диференціально-трансформаторним перетворювачем, не мають відлікового пристрою і застосовуються у комплекті з вторинними приладами дифтрансформаторної системи.

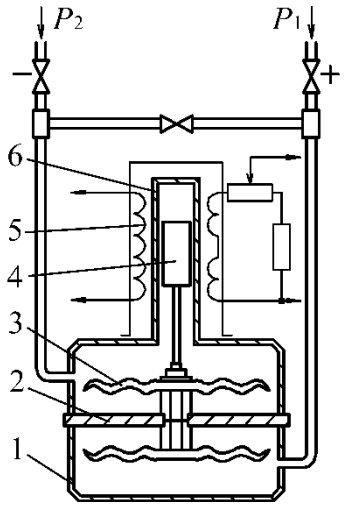


Рисунок 9.12 – Схема дифманометра мембранного типу ДМ

Чутливим елементом приладу є мембранний блок, який складається з двох мембранних коробок 1 і 3, закріплений з двох сторін основи 2.

Основа з верхньою і нижньою кришками корпуса приладу утворюють дві камери: нижню – «плюсову» та верхню – «мінусову». Внутрішні порожнини

мембранних коробок, заповнені дистильованою водою, сполучаються через отвір у перегородці.

З центром мембрани верхньої коробки за допомогою немагнітного штока жорстко зв'язане осердя 4 диференціально-трансформаторного перетворювача 5. Осердя знаходиться всередині роздільної трубки 6, виготовленої з немагнітної нержавіючої сталі. У дифманометрі передбачено пристрій, який дозволяє переміщувати перетворювач вздовж роздільної трубки для початкової корекції нульового значення вихідного параметра.

Тиск P_1 і P_2 до камер дифманометра підводиться через два запірних вентилі, розташованих на вертикальних трубках. Для сполучення між собою плюсової та мінусової камер служить зрівнювальний вентиль, розташований нижче запірних вентилів. Під дією різниці тисків $P_1 - P_2$ нижня мембранна коробка стискається, рідина з неї перетікає у верхню коробку, викликаючи переміщення центру мембрани верхньої коробки, а разом з тим і осердя диференціально-трансформаторного перетворювача. Це переміщення приводить до зміни взаємної індуктивності між первинною та вторинною обмоткою перетворювача, і відповідно, до зміни його вихідної напруги пропорційно до вимірюваного перепаду тиску.

Якщо фактичний перепад тиску перевищує граничний номінальний або одна з мембранних коробок знаходиться під дією одностороннього перевантаження, поломки коробок не станеться, бо мембрани цієї коробки складуться по профілю, витіснивши рідину у іншу коробку.

Контрольні питання

1. Які одиниці використовуються для означення величини тиску?
2. На якому принципі ґрунтується дія рідинних манометрів?
3. У чому полягає основна перевага поршневих манометрів?
4. Чутливі елементи якого типу застосовуються у приладах тиску?
5. Для яких тисків використовуються п'єзоелектричні перетворювачі?
6. У чому полягає особливість тензорезистивного методу вимірювання?
7. Для яких вимірювань найчастіше використовуються дифманометри?

ТЕМА 10
ВИМІРЮВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТА ВИТРАТ

План

10.1 Загальні відомості про вимірювання витрат рідин і газів.
10.2 Вимірювання витрат за перепадом тиску.
10.3 Витратоміри постійного перепаду тиску.
10.4 Лічильники кількості витрат.
10.5 Ультразвукові витратоміри.

10.1 Загальні відомості про вимірювання витрат рідин і газів

Кількість речовини – рідини або газу, яка проходить через переріз трубопроводу за одиницю часу, або за деякий проміжок часу, прийнято називати витратами. Кількість речовини виражається в одиницях об'єму – метр кубічний ($м^3$) і літр (л), або в одиницях маси – кілограм (кГ) і тонна (т).

Витрати вимірюються витратомірами та лічильниками кількості.

Лічильники кількості визначають кількість речовини за інтервал часу між двома відліками, тобто вимірювати об'ємні витрати.

Витратоміри дозволяють визначати значення витрат у будь-який момент часу, тобто вимірювати миттєві витрати. Миттєві витрати вимірюються в $м^3/с$ або кГ/с. Якщо витратомір оснастити інтегруючим пристроєм, то він буде виконувати функції витратоміра і лічильника кількості.

За методом вимірювання витратоміри можна поділити на наступні основні групи:

– пневматичні або напірні – вимірювання витрат виконується за швидкістю потоку в одній або декількох точках перерізу трубопроводу;

– змінного перепаду тиску – вимірювання витрат виконується за перепадом тиску на місцевому звуженні потоку речовини;

– постійного перепаду тиску або обтікання – вимірювання витрат виконується за перерізом потоку біля рухомого елемента, що обтікається вимірюваною речовиною;

– електромагнітні або індукційні – вимірювання витрат виконується за е.р.с., що індукується електропровідною рідиною, яка перетинає магнітне поле;

– ультразвукові – вимірювання витрат виконується за зміщенням звукових коливань рухомою речовиною;

– тахометричні – вимірювання витрат виконується за швидкістю обертання ротора, крильчатки або диска, розташованих у потоці речовини.

10.2 Вимірювання витрат за перепадом тиску

Найпоширенішим методом вимірювання миттєвих витрат рідин та газів є метод змінного перепаду тиску. Вимірювання витрат за цим методом основане на вимірюванні потенційної енергії речовини, що протікає через місцеве звуження у

трубопроводі. У вимірювальній техніці в якості звужуючих пристроїв використовуються діафрагми, сопла та сопла Вентурі.

У якості звужуючого пристрою найчастіше використовується діафрагма. Діафрагма (рис. 10.1) виконується у вигляді тонкостінного диска, встановленого в трубопроводі так, щоб отвір у диску був концентричним до внутрішнього контуру перерізу трубопроводу.

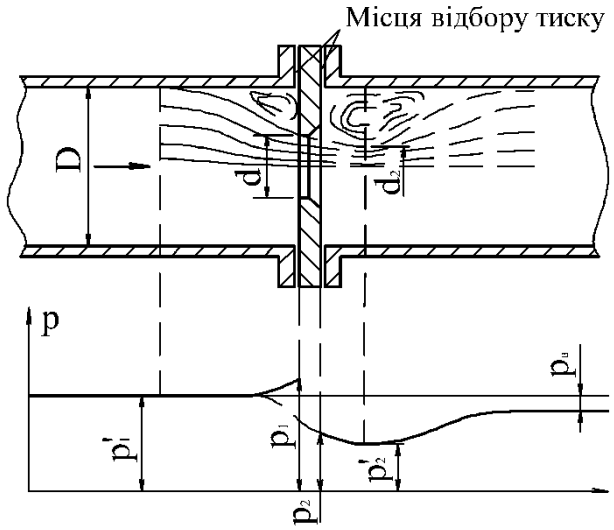


Рисунок 10.1 – Характер потоку і графік розподілу статичного тиску на звужуючому пристрої

Звуження потоку починається до діафрагми; потім, на деякій відстані за нею, завдяки сил інерції потік звужується до мінімального перерізу d_2, а далі поступово розширюється до повного перерізу трубопроводу. Перед діафрагмою та за нею утворюються зони з вихровим рухом.

Тиск потоку біля стінки трубопроводу дещо зростає через підпір перед діафрагмою та знижується до мінімуму за діафрагмою у найвужчому місці потоку. Далі з розширенням струменя тиск потоку біля стінки знову підвищується, але не досягає попереднього значення. Втрата частини тиску $p_в$ визначається головним чином втратою енергії на тертя та звихрення.

Таким чином, біля передньої та задньої стінки діафрагми виникає різниця тисків $\Delta p = p_1 - p_2$, яка однозначно визначає витрати речовини, що проходить у трубопроводі через звужуючий пристрій.

Вимірювання перепаду тиску на звужуючому пристрої практично виконується через окремі циліндричні отвори, розташовані біля торців діафрагми, або через дві кільцеві камери, кожна з яких з’єднується з внутрішньою порожниною трубопроводу кільцевою щілиною.

Теорія та основні рівняння методу змінного перепаду тиску однакові для звужуючих пристроїв всіх типів. Різниця полягає лише у значеннях деяких коефіцієнтів, що визначаються дослідним шляхом.

Отже, вимірювання витрат за методом змінного перепаду тиску зводиться до вимірювання різниці тисків p_1 і p_2, що створюється звужуючим пристроєм, безпосередньо на трубопроводі за допомогою пристроїв відбору.

Для стаціонарного потоку неподатливої рідини з густиною ρ (рис. 10.1) рівняння Бернуллі буде мати вигляд:

$$\frac{\rho v_{сер_2}^2}{2} - \frac{\rho v_{сер_1}^2}{2} = p_1 - p_2, \qquad (10.1)$$

а рівняння нерозривності потоку:

$$F v_{сер_1} = F_1 v_{сер_2} = \mu' F_0 v_{сер_2}, \qquad (10.2)$$

де F – площа поперечного перерізу трубопроводу, м^2;

F_0 – площа отвору діафрагми, м^2;

F_1 – площа перерізу потоку у місці його найбільшого стискання, м^2;

$\mu' = F_0 / F$ – коефіцієнт стискання потоку, який залежить від типу звужуючого пристрою;

$v_{сер1}$ і $v_{сер2}$ – середні швидкості потоку у перерізах до та після діафрагми;

p_1 і p_2 – абсолютний тиск у цих же перерізах відповідно.

У реальних умовах виникають додаткові фізичні явища, наприклад, втрати тиску на в'язкісне тертя, вихрові опори, нерівномірний розподіл швидкостей, зміна густини тощо.

Тоді рівняння витрат приймуть вигляд:

$$Q = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)}; \qquad (10.3)$$

$$M = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2}, \qquad (10.4)$$

де $\alpha = \dfrac{\mu' \xi}{\sqrt{1 - (\mu')^2 m^2}}$, відповідно $m = F_0 / F$ – відносна площа звужуючого пристрою.

Рівняння (10.3) і (10.4) є загальними для всіх витратомірів змінного перепаду тиску і придатними для стискуваних та нестискуваних речовин. Для нестискуваних речовин $\varepsilon = 1$.

Коефіцієнт α. Що входять у рівняння називається коефіцієнтом витрат. Цей коефіцієнт залежить від відносної площі m звужуючого пристрою. Він враховує складні гідродинамічні явища, які виникають у потоці.

Для реалізації методу змінного перепаду тиску необхідні три пристрої, об'єднані загальним визначенням витратомір змінного перепаду:

– пристрій для створення перепаду тиску у потоці за рахунок місцевої зміни швидкості потоку або за значенням (звужуючі пристрої) або за напрямком (зігнуті ділянки труби);

– вимірювальний прилад – дифманометр, що вимірює перепад тиску;

– з'єднувальний пристрій, що передає перепад тиску від потоку до

дифманометра.

Як звужуючі пристрої найчастіше використовуються нормальні діафрагми – плоскі та камерні, нормальні сопла і труби (сопла) Вентурі.

Нормальна діафрагма (рис. 10.2) являє собою тонкий диск з отвором, концентричним до осі труби, з гострою прямокутною крайкою зі сторони входу потоку.

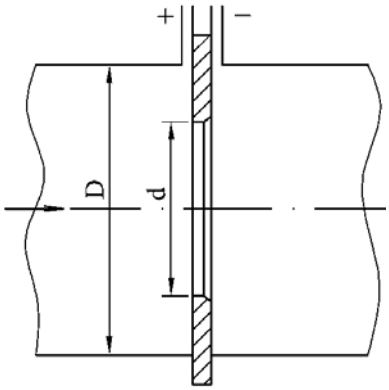


Рисунок 10.2 – Плоска безкамерна діафрагма

Тиск від плоскої діафрагми відбирають за допомогою окремих отворів у трубопроводі біля її торців.

Тиск у камерних діафрагмах відбирається з камер, з'єднаних з трубою кільцевими щілинами. Перевагою камерних діафрагм є відбір дійсних середніх тисків, що дозволяє дещо знизити вимоги до прямолінійних ділянок трубопроводу; недолік – необхідність спеціальних ущільнювальних пристроїв для герметизації камер.

Нормальне сопло (рис. 10.3) виконується у вигляді насадки, що має вхідну частину, яка далі звужується, утворену дугами з радіусами r_1 і r_2, рівними 0,2d і d/3 та циліндричну частину діаметром d і довжиною 0,3d.

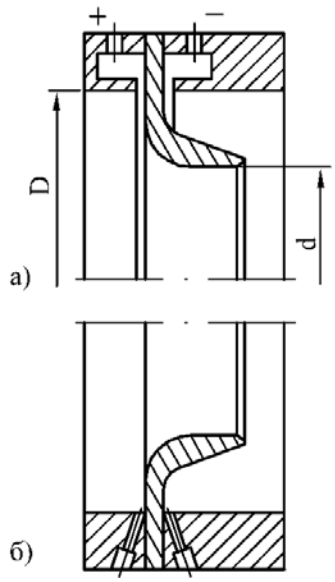


Рисунок 10.3 – Нормальне сопло: а) з камерним відбором тиску;
б) безкамерний відбір

Труби Вентурі використовуються чотирьох конструктивних різновидів: труби Вентурі з сопловим і конічним входами, з довгим і коротким дифузорами.

Для вимірювання перепаду тиску на звужуючому пристрої та отримання інформаційного сигналу використовуються диференціальні манометри різного принципу дії. Практична система для вимірювання витрат складається із декількох окремих пристроїв. У трубопровід, яким протікає вимірювана речовина, встановлюється стандартна діафрагма, сопло або сопло Вентурі. Перепад тиску на звужуючому пристрої, що є мірою витрат, вимірюється диференціальним манометром, оснащеним телеметричною системою для передачі вихідного сигналу на віддаль до вторинного вимірювального приладу.

10.3 Витратоміри постійного перепаду тиску

Витратоміри постійного перепаду тиску широко використовуються в системах автоматичного контролю та регулювання в різних галузях промисловості завдяки конструктивній простоті, високої чутливості і, внаслідок цього, можливості застосування для вимірювання досить незначних витрат, можливості застосування для агресивних речовин, простоти автоматизації вимірювань, великого діапазону вимірювання, незначних втрат тиску.

Витратоміри постійного перепаду тиску належать до засобів вимірювання, які називаються витратомірами обтікання. Існують витратоміри постійного перепаду тиску трьох конструктивних різновидів: ротаметри, поршневі та поплавкові витратоміри. Принцип дії всіх цих приладів заснований на силовій взаємодії потоку та переміщенні у ньому тіла.

Основними елементами ротаметра (рис. 10.4), принципово необхідними для його роботи, є розширена доверху конічна трубка 1 та поміщений у неї поплавок 2. Для візуального відліку показів використовують скляну трубку, безпосередньо на яку нанесено поділки шкали.

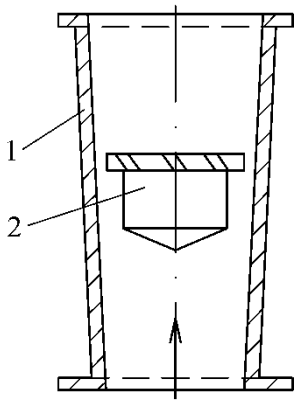


Рисунок 10.4 – Схема ротаметра: 1 – конусна трубка; 2 – поплавок

Поплавок складається з нижньої конічної та середньої циліндричної частини, яка закінчується буртиком з косими канавками. Призначення канавок – забезпечити стійке обертання поплавка під час протікання речовини, що необхідно для центрування відносно осі трубки.

Якщо ротаметр призначається для роботи в системах автоматичного регулювання або контролю, то прилад повинен оснащуватись додатковим пристроєм, який перетворює хід поплавка у пропорційний механічний, електричний або пневматичний сигнал.

Принципова схема поплавкового витратоміра з електричною диференціально-трансформаторною дистанційною передачею показів приведена на рисунку 10.5.

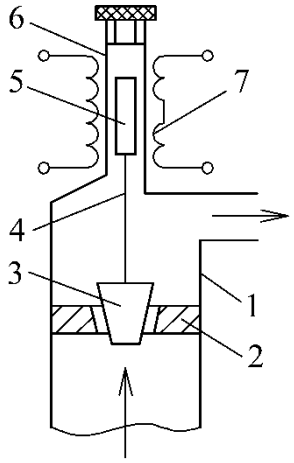


Рисунок 10.5 – Схема поплавкового витратоміра з диференціально-трансформаторним перетворювачем

Принцип дії ротаметрів полягає в наступному. Гідродинамічний тиск потоку вимірюваної речовини діє на поплавок і викликає його вертикальне переміщення. У зв’язку з конусністю трубки, від переміщення поплавка змінюється площа прохідного перерізу приладу, що утворюється діаметром буртика поплавка і внутрішньою стінкою трубки. Ця зміна площі відбувається таким чином, що перепад тиску знизу і зверху поплавка залишається практично постійним.

Поплавок буде підніматись до того часу, доки його вага і вага зв’язаних з ним елементів не врівноважиться динамічний тиск потоку речовини.

Вимірювальна частина витратоміра (рис. 10.5) складається з циліндричного металевого корпуса 1 з діафрагмою 2. Всередині діафрагми переміщується конусний поплавок 3, жорстко закріплений на штокові 4. На верхньому кінці штока закріплений сердечник 5 диференціально-трансформаторного перетворювача. Сердечник переміщується всередині роздільної трубки 6, ззовні якої закріплені обмотки 7 перетворювача.

10.4 Лічильники кількості витрат

Лічильниками називаються прилади для вимірювання кількості речовини, що протікає трубопроводом за певний проміжок часу. Ця кількість визначається за різницею показів вказівника лічильника, зафіксованих на початку і вкінці відлікового інтервалу часу.

Лічильники рідин за принципом вимірювання можна поділити на дві групи:

швидкісні та об’ємні.

Кожен лічильник включає два функціональних вузли: гідравлічний або пневматичний та відліковий.

У швидкісних лічильниках рідина або газ, що протікає через прилад, заставляє обертатись крильчатку або турбіну із швидкістю пропорційною до швидкості потоку, а відповідно, і кількості пропущеної рідини. Кількість обертів чутливого елемента підсумовується відліковим механізмом приладу. Похибка таких лічильників складає приблизно ±2%.

Схема швидкісного крильчатого лічильника приведена на рисунку 10.6, а турбінного – на рисунку 10.7.

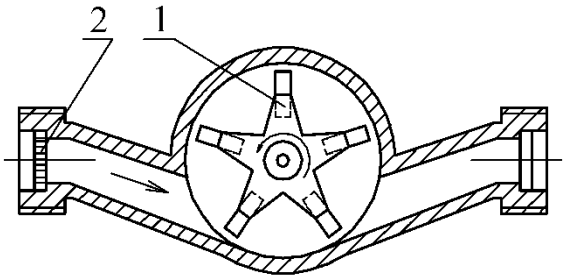


Рисунок 10.6 – Схема вимірювального пристрою швидкісного крильчатого лічильника: 1 – крильчатка; 2 – сітка запобіжна

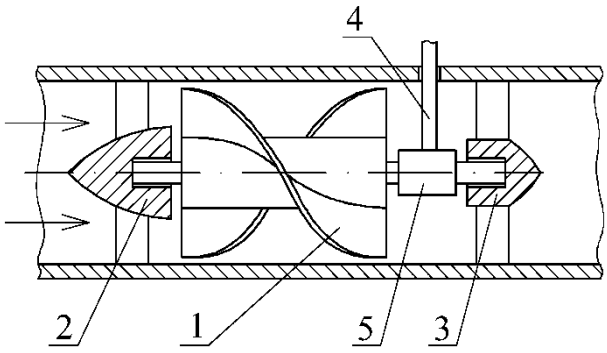


Рисунок 10.7 – Схема вимірювального пристрою швидкісного турбінного лічильника: 1 – турбінка; 2 – передній обтічник; 3 – задній обтічник; 4 – вал до лічильного механізму; 5 – черв’ячна передача

У лічильниках з вертикальними крильчатками потік рідини, що поступає у гідравлічний пристрій, направлений тангенціально до середнього радіусу лопаток. У лічильниках з турбінкою потік рідини, що поступає у гідравлічний пристрій, направлений аксіально – паралельно до осі турбінки.

Лічильники з крильчатками використовуються для вимірювання відносно невеликих витрат, а з турбінкою – для великих витрат рідин.

Швидкісні лічильники дуже чутливі до в’язкості рідини, кількість якої вимірюється, а тому використовуються переважно, як побутові і промислові лічильники витрат води.

Об’ємні лічильники здійснюють вимірювання кількості рідин у широкому діапазоні в’язкості з досить високою точністю.

Існує багато конструкцій об’ємних лічильників, але найбільше поширення отримали поршневі лічильники та лічильники рідин з овальними шестернями (рис. 10.8).

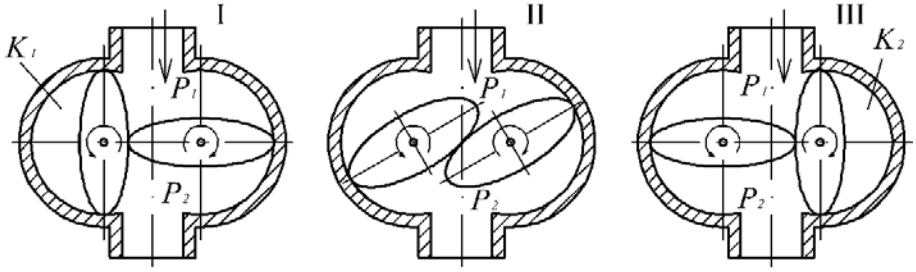


Рисунок 10.8 – Схема дії об’ємного лічильника з овальними шестернями

У вимірювальній камері лічильника розташовані дві овальні шестерні, примусово з’єднані між собою зубчатим зчепленням. Під дією різниці тисків до і після вимірювальної камери завдяки овальній формі шестерень виникає обертовий момент, який заставляє шестерні обертатися. Одночасно з кожним обертом переміщується певний об’єм вимірювальної рідини.

Схема дії лічильника показана на рисунку 10.8. У положенні I обертовий момент за різниці тисків ($P_1 – P_2$) виникає на лівій шестерні та заставляє її обертатись і обертати праву шестерню. У положенні II обертовий момент виникає на обох шестернях. У положенні III обертовий момент виникає на правій шестерні, а ліва стає веденою. За один оберт вимірювальні порожнини K_1 і K_2 двічі наповнюються та двічі випорожнюються. Таким чином, за один оберт лічильник з овальними шестернями пропускає об’єм рідини, рівний чотирьом об’ємам K_1 (або K_2).

Передача руху від шестерень до передатного та лічильного механізму виконується від однієї з шестерень за допомогою магнітної муфти.

10.5 Ультразвукові витратоміри

Ультразвуковий метод вимірювання витрат оснований на явищі зміщення звукових коливань рухомого рідинного середовища.

Звукові коливання високої частоти (20 кГц і вище), що створюються електроакустичним випромінювачем *В1*, проходять через рідину, яка протікає трубопроводом, і реєструються приймачем *П1*, який знаходиться від випромінювача на відстані *L* (рис. 10.9).

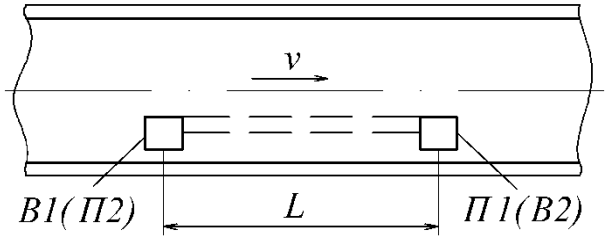


Рисунок 10.9 – Схема ультразвукового витратоміра

Якщо v – швидкість потоку речовини, а c – швидкість звуку у цій речовині, то тривалість поширення звукової хвилі у напрямку руху потоку від випромінювача *В1* до приймача *П1*:

$$\tau_1 = \frac{L}{c+v}. \tag{10.5}$$

Тривалість поширення звукової хвилі проти руху потоку від випромінювача *В2* до приймача *П2*:

$$\tau_2 = \frac{L}{c-v}. \tag{10.6}$$

На основі (10.5) і (10.6) різниця часу, що вимірюється електронною системою,

$$\Delta\tau = \frac{2Lv}{c^2} \cdot \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}. \tag{10.7}$$

Зважаючи на те що v^2/c^2 дуже мала порівняно з одиницею (наприклад, для рідин, у яких c = 1000-1500 м/с, а v не перевищує 6-8 м/с, $v^2/c^2 < 6\cdot10^{-5}$), і виразивши швидкість потоку через витрати, отримаємо рівняння вимірювання ультразвукових витратомірів:

$$\Delta\tau = 2\varphi\frac{L}{Fc^2}Q, \tag{10.8}$$

де F – площа перерізу потоку;

φ – коефіцієнт, що враховує розподіл швидкостей по перерізу потоку.

Існують різні способи і різні вимірювальні схеми для визначення $\Delta\tau$:

– вимірювання різниці фазових зсувів ультразвукових хвиль, направлених по потоку та проти нього;

– вимірювання різниці частот повторення коротких імпульсів або пакетів ультразвукових коливань, направлених одночасно по потоку та проти нього;

– вимірювання різниці тривалості проходження коротких імпульсів, направлених одночасно по потоку та проти нього.

Існує також самостійний метод визначення витрат, оснований на вимірюванні зміщення потоком ультразвукової хвилі, направленої перпендикулярно до напряму руху речовини.

Чутливість ультразвукових витратомірів залежить від відношення v/c. Чим більше це відношення, тим вища чутливість приладу і менші похибки вимірювання.

Контрольні питання

1. Що таке звужуючий пристрій витратоміра?
2. Які прилади використовуються для вимірювання перепаду тиску?
3. Чому ротаметри називаються витратомірами постійного перепаду тиску?
4. Яка суттєва різниця між витратомірами та лічильниками витрат?
5. У чому полягає основна відмінність між швидкісними та об’ємними лічильниками кількості речовин?
6. У чому полягає принцип дії швидкісних лічильників?
7. На якому фізичному явищі ґрунтується ультразвуковий метод вимірювання витрат?
8. Які існують способи та схеми для визначення різниці часу $\Delta\tau$ в ультразвукових витратомірах?

ТЕМА 11
ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ

План

11.1 Класифікація методів та приладів для вимірювання рівня.
11.2 Візуальні та поплавкові рівнеміри.
11.3 Вимірювання рівня сипких речовин.
11.4 Гідростатичні та буйкові рівнеміри.
11.5 Ємнісні рівнеміри та кондуктометричні сигналізатори рівня.
11.6 Акустичні рівнеміри.

11.1 Класифікація методів та приладів для вимірювання рівня

Рівнем називається відносна висота заповнення технологічних ємкостей робочою речовиною: рідиною – водою, нафтою, спиртом, або сипкими матеріалами, наприклад, піском, зерном, вугіллям тощо.

Під вимірюванням рівня приймається індикація положення границі розділу двох середовищ різної густини відносно деякої горизонтальної площини, прийнятої за початок відліку. Рівень вимірюється в одиницях довжини. Засоби для вимірювання рівня називаються рівнемірами.

За принципом дії рівнеміри поділяють на: поплавкові, буйкові, гідростатичні, електричні, ультразвукові, радіоізотопні.

У залежності від того, які фізичні властивості речовин сприймає первинний перетворювач, рівнеміри поділяють на механічні, акустичні, електричні, оптичні та теплові.

Основні метрологічні характеристики будь-якого типу рівнемірів:

– статична функція перетворення або градуювальна характеристика, що описує зв’язок вихідних сигналів первинного перетворення з поточним значенням рівня;

– основна та додаткова похибка;

– варіація показів.

Для рівнемірів, які працюють в системах автоматичного регулювання технологічними процесами, необхідно нормувати та оцінювати динамічні характеристики – постійну часу, перехідну характеристику тощо.

Рівнеміри, які служать для сигналізації граничних значень рівня і не мають відлікового пристрою, називаються сигналізаторами рівня. Вони можуть бути одногранічними, двогранічними, тригранічними.

11.2 Візуальні та поплавкові рівнеміри

Візуальні рівнеміри – це прозорі вставки в стінках ємкості або сполучені з ємкістю мірні трубки з нанесеною на них шкалою.

Візуальні рівнеміри – найпростіші, і в той же час найбільш точні засоби вимірювання рівня.

За відповідного діаметра (що виключає вплив меніску) мірної трубки, підсвічування поверхні розділу і використанні спеціальних засобів відліку (наприклад, катетометрів) похибка візуальних рівнемірів за нерухомої поверхні рідини може бути зведена до десятих часток міліметра.

На практиці застосовуються вказівні трубки зі склом прохідного та відбитого світла (рис. 11.1).

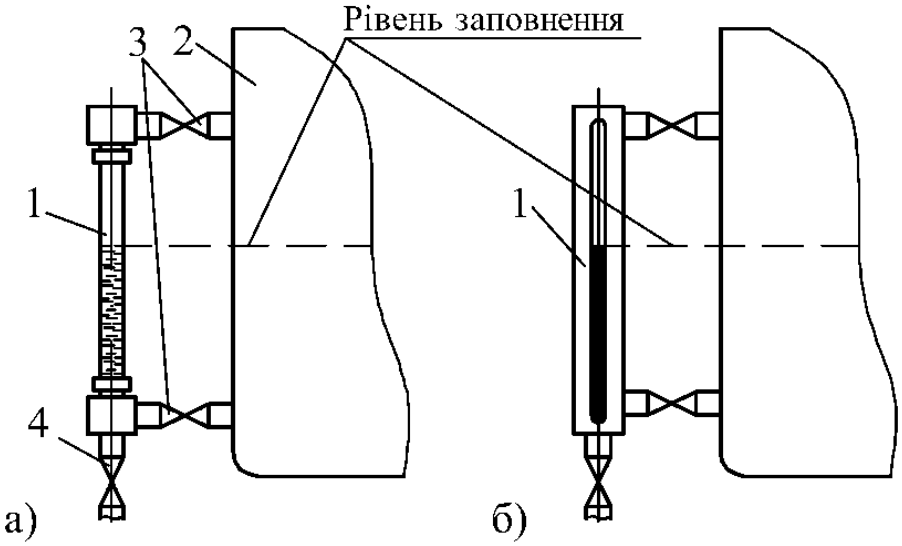


Рисунок 11.1 – Вказівні трубки прохідного (а) та відбитого (б) світла:
1 – рівнемірна трубка; 2 – ємкість з рідиною; 3 – запірні вентилі; 4 – зливний вентиль

Вказівне скло відбитого світла – це товста скляна пластина, на поверхні якої, поверненої до рідини, нанесені паралельні канавки. Промені світла, що попадають на скло, відбиваються від похилих граней канавок у газовій частині і проходять всередину в частині заповненій рідиною. Частина скла, яка контактує з рідиною, буде візуально темною, а частина скла, за якою газ або пара – сріблясто-білою (рис. 11.1, б).

Рівнемірні трубки застосовуються до тисків в ємкості до 2,94 МПа та до температури рідини – до 300°С.

У поплавковому рівнемірі переміщення поплавка на поверхні рідини передається на відліковий пристрій або перетворювач для перетворення переміщення чи сили у вихідний сигнал.

Сила виштовхування, яка діє на поплавок довільної форми, за законом Архімеда (рис. 11.2):

$$F(x) = \rho_0 g \int_{h-x}^{h} S(x)dx + \rho g \int_{0}^{x} s(x)dx, \qquad (11.1)$$

де ρ_0 – густина середовища над контрольною рідиною;

g – прискорення вільного падіння;

ρ – густина рідини, у яку занурена нижня частина поплавка;

S – площа перерізу поплавка.

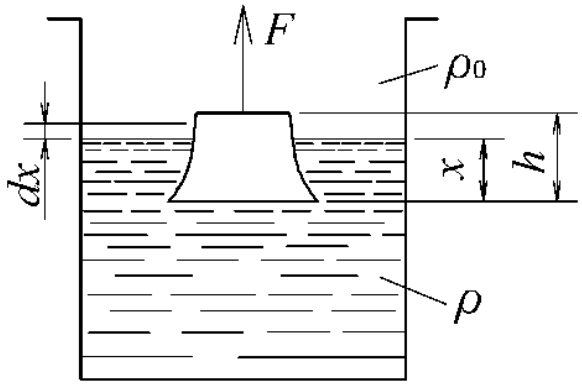


Рисунок 11.2 – Схема переміщення поплавка

Об’єм поплавка:

$$V = \int_0^h S(x)dx, \tag{11.2}$$

де h – висота поплавка.

Тоді,

$$F(x) = \rho_0 gV + (\rho - \rho_0)g\int_0^x S(x)dx. \tag{11.3}$$

Для поплавка постійного перерізу:

$$F = Sh\rho_0 g + (\rho - \rho_0)gSx. \tag{11.4}$$

Якщо над рідиною знаходиться повітря, то $\rho_0 = 0$. Тоді у загальному випадку:

$$F = \rho g\int_0^x S(x)dx. \tag{11.5}$$

Для поплавка постійного перерізу:

$$F = \rho gSx. \tag{11.6}$$

Найпростіші поплавкові рівнеміри складаються з поплавка і противаги, які з’єднані між собою тросиком. У нижній частині противаги закріплена стрілка, вказує на шкалі значення рівня рідини в резервуарі (рис. 11.3).

Поплавок 1 підвішений на гнучкому тросі, перекинутому через ролики 2. На іншому кінці троса закріплений вантаж 3 для підтримання постійного натягу троса. На тросі закріплено стрілку, яка показує на шкалі 4 рівень рідини.

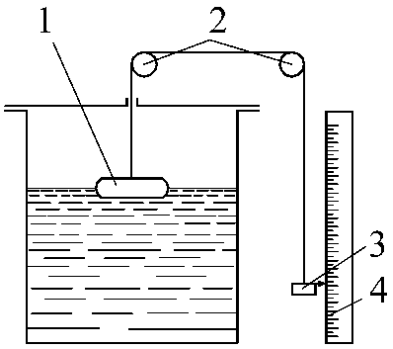


Рисунок 11.3 – Схема поплавкового рівнеміра: 1 – поплавок; 2 – напрямні ролики; 3 – вантаж; 4 – шкала

Якщо знехтувати вагою тросика та тертям в роликах передавального механізму, то стан системи «поплавок – вантаж» описується рівнянням:

$$G_{пв} = G_n - S_n h_1 \rho g\,, \qquad (11.7)$$

де $G_{пв}$, G_n – відповідно, вага вантажу та поплавка;

S_n – площа поплавка;

h_1 – глибина занурення поплавка;

ρ – густина рідини;

g – прискорення тяжіння.

Такий простий пристрій у багатьох випадках є оправданим і може забезпечити достатню точність. Недоліки простого поплавкового рівнеміра:

– перевернута шкала – відлік починається зверху;

– похибка від непостійності сили натягу троса – у нижньому положенні до ваги вантажу додається вага троса.

11.3 Вимірювання рівня сипких речовин

Вимірювання рівня сипких матеріалів має свої особливості. Характерна відмінність сипких речовин від рідких – непропорційність передачі тиску на дно та стінки в залежності від висоти рівня заповнення.

Якщо вимірюванням рівня визначається вага речовини, то важливо знати його об’ємну та питому вагу, а також вологість.

Якщо вільно насипати з однієї точки сипку речовину, то утворюються відкоси. Утворення відкосів є наслідком тертя та зчеплення між частинками. Деякі сипкі матеріали від тривалого зберігання в ємкостях втрачають рухливість частинок. Такий стан називається злежуваністю.

Часто необхідно враховувати липкість матеріалів, тобто здатність деяких сипких матеріалів прилипати до твердих тіл.

Для контактних методів вимірювання, коли чутливий елемент знаходиться в товщині матеріалу необхідно враховувати абразивність матеріалу, тобто його здатність стирати поверхні, з якими є механічне контактне взаємне переміщення.

Деякі сипкі речовини, які утворюють повітряний пил, стають фактором

підвищеної вибухо- та пожежної небезпеки. У деяких випадках пил може бути струмопровідним.

Всі ці фактори створюють специфічні вимоги та обмеження до вимірювальних засобів і методів вимірювання рівня сипких матеріалів.

У багатьох випадках протікання технологічного процесу не вимагає необхідності мати поточне значення рівня заповнення ємкості і достатньо виконувати контроль верхнього та нижнього рівнів сипких матеріалів.

Властивість сипких матеріалів створювати тиск як на дно, так і на стінки ємкості використовується у мембранних вказівниках рівня (рис. 11.4). Мембранні прилади є вказівниками тільки одного рівня. Це пояснюється неоднозначністю ваги стовпа насипного матеріалу його тиску на дно чи стінки ємкості. Тиск у цьому випадку є функцією форми ємкості, коефіцієнту внутрішнього тертя та коефіцієнту тертя сипких тіл об стінки ємкості.

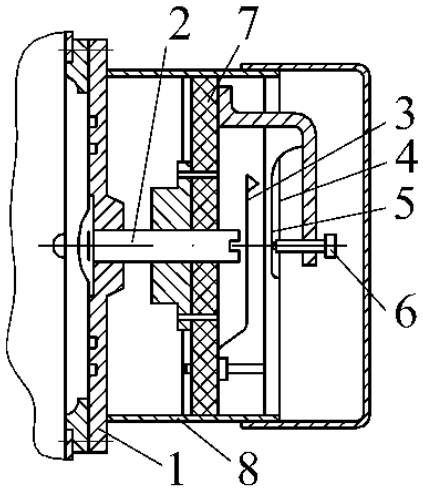


Рисунок 11.4 – Вказівник рівня з металевою мембраною: 1 – мембрана; 2 – шток; 3 – контактний пристрій; 4 – кронштейн; 5 – пружина; 6 – гвинт регулювальний; 7 – плата; 8 – корпус

Мембранний вказівник рівня складається з металевої мембрани 1 з закріпленим у центрі штоком 2. Прогинання мембрани шток передає на контактний пристрій 3. На кронштейні 4 закріплена зворотна пружина 5. Регулювання натягу зворотної пружини здійснюється гвинтом 6. Ізолююча плата 7 закріплюється у корпусі 8.

Використовуються вказівники рівня, які працюють на принципі гальмування крильчатки, що обертається на валу.

У вказівниках такої конструкції синхронний двигун за допомогою зубчатої та черв’ячної передачі обертає крильчатку. Крильчатка обертається то того часу, доки її торкнеться шар матеріалу, який засипається в ємкість. Шар матеріалу спочатку пригальмовує, а потім зупиняє обертання крильчатки. Разом з нею зупиняється і черв’ячне колесо.

Разом з черв’яком, долаючи зусилля пружини повернення, переміщується штовхач, який діє на головку мікроперемикача, розмикаючи електричні кола сигналізації. Таким чином можна здійснювати автоматичне управління процесами

завантаження чи дозування сипких матеріалів.

Для контролю рівня сипких матеріалів широко використовуються засоби, дія яких ґрунтується на електричних властивостях середовища вимірювання. Переважно це ємнісні сигналізатори та рівнеміри, що реагують на зміну діелектричної постійної об'єму ємкості в залежності від наявності в ній сипкого матеріалу. У якості чутливого елементу використовується стержень чи пластина, які служать однією з обкладинок конденсатора. Іншою обкладинкою слугують стінки самої ємкості.

Досить ефективним у багатьох випадках для вимірювання рівня сипких матеріалів є застосування акустичних рівнемірів.

11.4 Гідростатичні та буйкові рівнеміри

Вимірювання рівня гідростатичними рівнемірами зводиться до вимірювання гідростатичного тиску P, який створюється стовпом h рідини постійної густини ρ, згідно з рівнянням:

$$P = \rho g h. \qquad (11.8)$$

Вимірювання гідростатичного тиску здійснюється:

- манометром, встановленим на висоті, що відповідає нижньому граничному значенню рівня;

– диференціальним манометром, підключеним до резервуару на висоті, що відповідає нижньому граничному значенню рівня та до газового простору над рідиною;

– вимірюванням тиску газу, наприклад, повітря, який прокачується по трубці, опущеній в рідину, яка заповнює резервуар, на фіксовану глибину.

Рівнеміри, у яких вимірювання гідростатичного тиску здійснюється шляхом вимірювання тиску газу, що прокачується по зануреній у рідину трубці, називають п'єзометричними. Схема п'єзометричного рівнеміра наведена на рисунку 11.5.

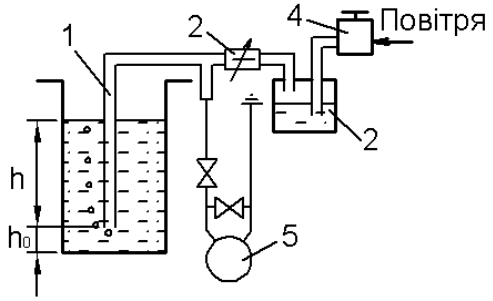


Рисунок 11.5 – Схема п'єзометричного рівнеміра

П'єзометрична трубка розміщується в апараті, у якому вимірюється рівень. Газ поступає в трубку через дросель 2, що служить для обмеження витрат. Для вимірювання витрат газу служить стаканчик 3 (витрата з допомогою стаканчика

визначається за кількістю бульбашок, які пройшли через рідину, яка його заповнює, за одиницю часу), а тиск підтримується постійним за допомогою стабілізатора тиску 4. Тиск газу після дроселя вимірюється дифманометром 5 і є мірою рівня.

При подачі газу тиск в п'єзометричній трубці поступово підвищується до того часу, поки вказаний тиск не стане рівним тиску стовпа рідини висотою *h*. Коли тиск у трубці стане рівним гідростатичному тиску, із нижнього відкритого кінця трубки починає виходити газ. Витрату підбирають такою, щоб газ покидав трубку у вигляді окремих бульок – приблизно одна булька за секунду.

Для стабілізації витрат газу в п'єзометричних рівнемірах може додатково встановлюватися мембранний стабілізатор витрат. Дія стабілізатора основана на автоматичному регулюванні постійного перепаду тиску на дроселі 2.

В основу роботи буйкових рівнемірів покладено фізичне явище, що описується законом Архімеда. Чутливим елементом у цих рівнемірів є циліндричний буйок, виготовлений з матеріалу, що має густину, більшу за густину рідини (рис. 11.6). Буйок займає вертикальне положення і частково занурений в рідину. Вимірювальним параметром тут є сила виштовхування, що діє на занурений буйок, величина якої пропорційна глибині його занурення в рідину.

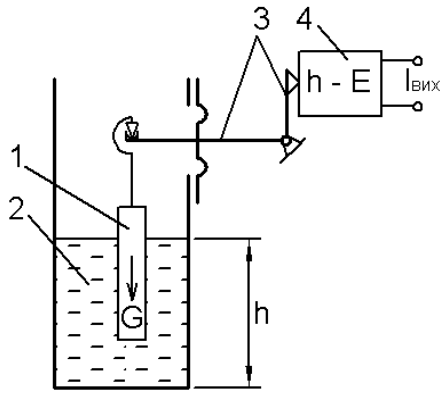


Рисунок 11.6 – Схема буйкового рівнеміра з електричним виходом: 1 – буйок масою *G*; 2 – ємкість; 3 – система важелів; 4 – нормуючий перетворювач

Довжина буйка визначається в залежності від встановлених значень рівнів: верхнього *ВР* і нижнього *НР*. Буйкові рівнеміри найчастіше використовуються як пристрої інформації в системах автоматичного регулювання, захисту та сигналізації.

Поплавкові й буйкові вимірювачі рівня виготовляються різних конструктивних форм. Діапазон вимірювання рівня вибирається з ряду: від 0 до 0,25, 0,4 … і до 20 м. Клас точності може бути 0,6; 1,0; 1,6; і 2,5.

Для перетворення рівня в уніфікований струмовий сигнал розроблені буйкові електричні рівнеміри, оснащені уніфікованими перетворювачами «сила – струм». Підключення буйка до уніфікованого перетворювача здійснюється за схемою поданою на рисунку 11.5.

11.5 Ємнісні рівнеміри та кондуктометричні сигналізатори рівня

У ємнісних рівнемірах використовується залежність електричної ємності чутливого елемента первинного вимірювального перетворювача від рівня рідини. Конструктивно ємнісні чутливі елементи виконують у вигляді коаксіально розташованих циліндричних електродів або паралельних плоских електродів (рис. 11.7).

У загальному вигляді електрична ємність циліндричного конденсатора визначається рівнянням:

$$C = 2\pi\varepsilon\varepsilon_0 H / \ln\frac{D}{d}, \qquad (11.9)$$

де ε – відносна діелектрична проникність речовини, що заповнює міжелектродний простір;

ε_0 – діелектрична проникність вакууму;

H – висота електродів;

D, d – діаметр, відповідно, зовнішнього та внутрішнього електродів.

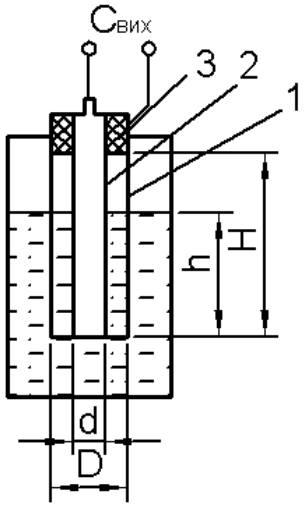


Рисунок 11.7 – Схема ємнісного коаксіального рівнеміра: 1, 2 – електроди; 3 – прохідний ізолятор

Перетворення електричної ємності в сигнал вимірювальної інформації здійснюється мостовим, резонансним або імпульсним методом.

Ємнісні рівнеміри випускаються класів точності 0,5; 1,0; 2,5. Мінімальний діапазон вимірювання складає 0-0,4 м, максимальний – 0-20 м.

Ємнісні рівнеміри широко використовуються для вимірювання рівня сипких матеріалів.

Кондуктометричні сигналізатори рівня (рис. 11.8) призначені для сигналізації рівня електропровідних рідинних і сипких середовищ з питомою провідністю більше 10^{-3} См/м. Дія цих приладів ґрунтується на використанні властивості речовин, рівень яких контролюється, проводити електричний струм.

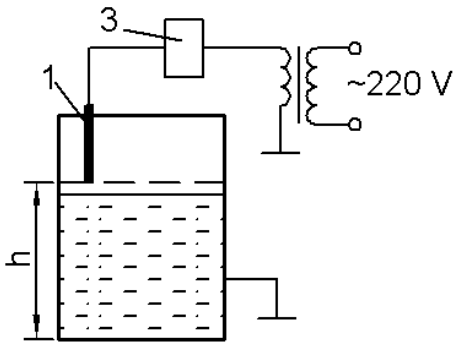


Рисунок 11.8 – Схема кондуктометричного сигналізатора граничного рівня

На точність кондуктометричних рівнемірів може суттєво впливати зміна електропровідності робочої рідини, поляризація середовища біля електродів. Тому релейний елемент 3 переважно включається в коло змінного струму – вторинної обмотки трансформатора.

Електроди, які використовуються в кондуктометричних сигналізаторах рівня виготовляються зі сталі спеціальних марок або вугільні. Вугільні використовуються тільки для рідин.

Сигналізатори рівня широко використовуються в схемах автоматизації, коли проміжні значення рівня рідини в резервуарі не відіграють ролі, а необхідно визначати тільки дискретні значення рівня рідини. Промислові кондуктометричні реле-регулятори рівня випускаються на реагування від одного до чотирьох незалежних фіксованих рівнів.

11.6 Акустичні рівнеміри

В акустичних рівнемірах найчастіше використовується принцип локації. У відповідності з цим принципом вимірювання рівня здійснюється за часом проходження ультразвуковими коливаннями віддалі від випромінювача до межі розділу двох середовищ і навпаки до приймача випромінювання. Локація межі розділу двох середовищ здійснюється або зі сторони газу, або зі сторони робочого середовища – рідини чи сипкого матеріалу.

Рівнеміри, у яких локація межі розділу середовищ здійснюється зі сторони газу, називаються акустичними, а рівнеміри з локацією через шар робочого середовища – ультразвуковими.

Локаційні рівнеміри (рис. 11.9) реалізують ефект відбиття звукової хвилі від поверхні розділу середовищ. Генератор 1 випромінює в рідину пачку імпульсів ультразвукової частоти. Відбитий від межі розділу рідина-газ сигнал уловлюється приймачем 2 ультразвукових коливань.

Час t між моментом посилання зондуючого імпульсу та моментом приходу відбитого від рівня імпульсу пов’язаний з поточним значенням рівня залежністю:

$$t = \frac{2h}{c \cdot \sin \alpha}, \qquad (11.10)$$

де c – швидкість звуку в контрольному середовищі.

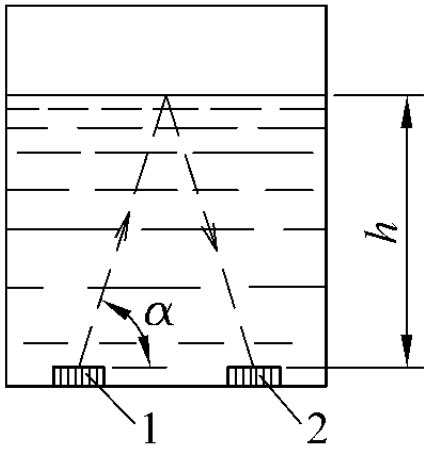


Рисунок 11.9 – Схема локаційного рівнеміра:
1 – генератор імпульсів; 2 – ультразвуковий приймач

Час t фіксується відповідною вимірювальною схемою та перетворюється у вихідний сигнал рівнеміра, пропорційний поточному значенню рівня h.

Більшість локаційних рівнемірів мають одноелементні давачі, у яких функції випромінювача й приймача поперемінно виконує один і той же елемент. У цьому випадку кут α в формулі (11.10) рівний $\pi/2$ і $\sin\alpha = 1$.

Перевагою акустичних рівнемірів є незалежність їх показів від фізико-хімічних властивостей і складу робочого середовища.

У акустичному рівнемірі (рис. 11.10) генератор 9 виробляє електричні імпульси з певною частотою повторення, які потім перетворюються в ультразвукові за допомогою акустичного перетворювача I, встановленого на кришці резервуара. Поширюючись вздовж акустичного тракту, ультразвукові імпульси відбиваються від площини межі розділу середовищ та попадають на той же перетворювач I. Відбиті ультразвукові імпульси після зворотного перетворення у електричні підсилюються, формуються підсилювачем-формувачем 1 та подаються на пристрій вимірювання часу запізнення відбитого сигналу – тригер 2.

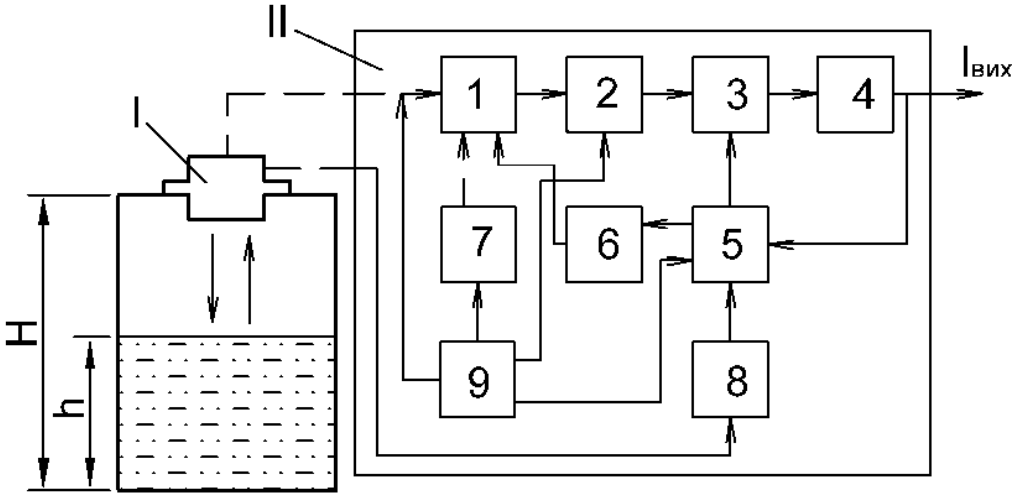


Рисунок 11.10 – Схема акустичного рівнеміра: I – первинний перетворювач;
II – проміжний перетворювач

Формування уніфікованого вихідного сигналу постійного струму 0–5 мА здійснюється за допомогою компенсаційного перетворювача, основаного на принципі статичного регулятора, до складу якого входить пристрій порівняння 3, підсилювальний елемент 4 і елемент зворотного зв'язку – блок перетворення напруги у часовий інтервал 5.

Для зменшення впливу зміни температури газу на покази приладу, так як швидкість поширення звуку у газовому середовищі залежить від температури, рівнемір включає блок температурної компенсації 8, який включає в себе термометр опору, встановлений всередині акустичного перетворювача. У схемі також передбачено завадозахисний пристрій 6, для виключення впливу різного роду завад на вході підсилювача 1.

Основні метрологічні характеристики рівнемірів будь-якого типу наступні:

– статична функція перетворення (градуювальна характеристика), що описує зв'язок вихідних сигналів первинного перетворювача з поточним значенням вимірюваної величини – рівня;

– основна похибка;

– варіація показів;

– додаткові похибки, зумовлені конструктивними особливостями рівнемірів, взаємодією чутливого елементу з середовищами, що утворюють поверхню розділу.

Перерахований комплекс характеристик визначається під час градуювання, повірки, атестації та випробуваннях рівнемірів.

Контрольні питання

1. Для чого призначені рівноміри рідин та сипких матеріалів?
2. Які властивості речовин використовуються для контролю їх рівня?
3. Які основні переваги та недоліки поплавкових рівнемірів?
4. У чому полягає складність контролю рівня сипких матеріалів?
5. Який прилад використовується для вимірювання рівня гідростатичним методом?
6. Що служить параметром контролю у буйкових рівнемірів?
7. На якому принципі базується робота кондуктометричних рівнемірів?
8. Який ефект покладено в основу роботи акустичних рівнемірів?
9. Від чого залежить точність акустичних рівнемірів?

ТЕМА 12
ВИМІРЮВАННЯ СКЛАДУ РІДИН

План

12.1 Електропровідність розчинів електролітів.
12.2 Електрокондуктометричні аналізатори.
12.3 Принцип дії та класифікація оптичних аналізаторів речовин.
12.4 Потенціометричний метод аналізу.
12.5 Порівняльні та вимірювальні електроди.
12.6 Вимірювальні схеми pH-метрів.

12.1 Електропровідність розчинів електролітів

Метод вимірювання електричної провідності розчинів електролітів – кондуктометрія, широко використовується для хімічного аналізу, фізико-хімічних досліджень та автоматичного контролю технологічних процесів.

Принцип дії електрокондуктометричних аналізаторів (кондуктометрів), які класифікуються як електрохімічні засоби вимірювання, полягає у вимірюванні електричної провідності розчинів електролітів, за якою визначається концентрація розчинених речовин.

У розчинах електролітів частина молекул дисоціює на позитивні і негативні іони, або катіони та аніони. Це надає розчинам властивість проводити електричний струм. Якщо рідина є частиною електричного кола, то вона поводить себе як електричний опір, провідність k якого визначається виразом:

$$k = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{l}, \qquad (12.1)$$

де ρ – питомий опір;

S і l – площа і довжина перерізу провідника.

Питома електропровідність розведеного однокомпонентного розчину електроліту визначається законом Кольрауша:

$$\chi = \alpha cz(U_к + U_a), \qquad (12.2)$$

де α – ступінь електролітичної дисоціації, що визначає частку молекул, які дисоціювали від загальної їх кількості у розчині;

c – еквівалентна концентрація розчину, виражена в грам-еквіваленті розчиненої речовини в 1 см^3 розчину;

z – валентність іонів;

$U_к$ і U_a – рухомість катіонів та аніонів відповідно.

Вид функції, що зв’язує питому електропровідність розчину з концентрацією, повною мірою залежить від цієї концентрації. Ця функція лінійна

тільки для розбавлених розчинів, доки сили електростатичної міжіонної взаємодії є незначними. Зі збільшенням концентрації вказана функція є нелінійною і навіть неоднозначною (рис. 12.1).

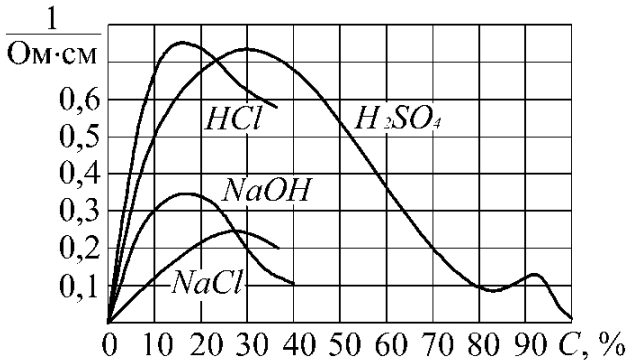


Рисунок 12.1 – Залежність питомої електричної провідності розчинів від їх концентрації (20°С)

Електрична провідність рідини суттєвим чином залежить від температури. Для водних розчинів електролітів підвищення температури на 1 °С призводить до зростання електричної провідності на 1 – 2,5%, а тому в кондуктометричних приладах необхідно передбачити автоматичну температурну корекцію показів або контрольний розчин у процесі вимірювання повинен бути термостатованим.

Електрична провідність рідини зростає з підвищенням температури за експоненціальним законом:

$$\chi = Ae^{-B/T}, \tag{12.3}$$

де A, B – сталі;

T – абсолютна температура.

У вузькому температурному інтервалі буде справедливим лінійне наближення:

$$\chi_t = \chi_{t0}\left[1 + \alpha(t - t_0)\right], \tag{12.4}$$

де χ_t, χ_{t0} – електрична провідність за температури відповідно t та t_0 = 18 °С;

α – температурний коефіцієнт електричної провідності.

12.2 Електрокондуктометричні аналізатори

Чутливі елементи кондуктометрів, за опором яких визначається концентрація розчину, що аналізується, називаються електролітичними вимірювальними комірками. За конструкцією розрізняють контактні та безконтактні комірки. В контактних комірках розміщуються електроди, а у безконтактних використовується електромагнітна взаємодія з розчином, що аналізується.

За кількістю електродів у контактній вимірювальній комірці розрізняють дво-, три- і чотириелектродні комірки.

Найпростіша двоелектродна комірка – це камера 1 (рис. 12.2, а) з двома інертними металевими електродами 2 і 3, що заповнена або промивається контрольною рідиною. Якщо до електродів прикласти постійну різницю потенціалів, то на межі метал – електрод – електроліт утвориться так званий подвійний електричний шар, в межах якого і протікають електрохімічні процеси в комірці. Цей шар розглядають як плоский конденсатор, обкладинками якого є заряджені поверхні металевого електрода та шар іонів протилежного знаку, що знаходяться поблизу поверхні електродів.

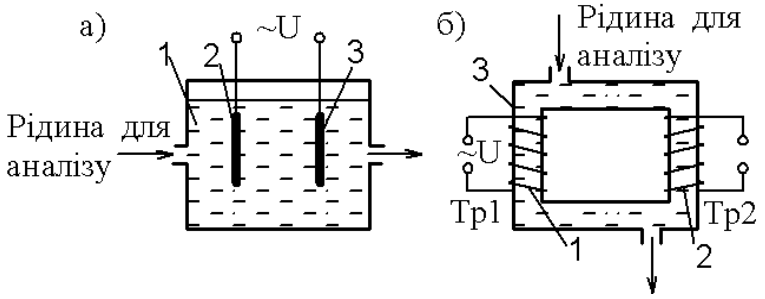


Рисунок 12.2 – Схеми електролітичних вимірювальних комірок:
а) контактна; б) безконтактна

Якщо через вимірювальну комірку пропустити змінний струм, то явище поляризації електродів приблизна на два порядки менше спотворює результат вимірювання електропровідності. Тому практично всі вимірювання електропровідності розчинів здійснюються на змінному струмі, а для зменшення похибки від поляризації частоту змінного струму збільшують.

Електричний опір вимірювальної комірки визначається виразом:

$$R = 1/\chi K, \qquad (12.5)$$

де K – константа вимірювальної комірки, що залежить від площі поверхні електродів, віддалі між ними та їх форми, яка визначається дослідним шляхом.

У безконтактній низькочастотній комірці (рис. 12.2, б) контрольна рідина поступає в трубку 3 з діелектрика, на яку ззовні намотані обмотки двох трансформаторів – збудження *Тр*1 та вимірювального *Тр*2. Обмотка 1 трансформатора *Тр*1 підключена до джерела змінного струму. Розчин контрольної речовини у трубці 3 утворює замкнутий рідинний виток і є вторинною обмоткою трансформатора *Тр*1. Під дією е.р.с., що наводиться первинною обмоткою 1 у замкнутому витку, у ньому протікає струм. Сила цього струму пропорційна електропровідності рідини, яка аналізується. Для вимірювального трансформатора *Тр*2 рідинний виток служить первинною обмоткою. Е.р.с., яка наводиться у його вторинній обмотці 2, залежить від сили струму, що проходить рідинним витком, тобто, визначається електропровідністю контрольної рідини.

У практиці автоматичного аналітичного контролю найпоширеніші кондуктометри з контактними вимірювальними комірками.

Вимірювальна комірка 1 (рис. 12.3) з опором контрольної рідини R_x, у яку з блоку підготовки поступає контрольна рідина, є одним з плечей врівноваженого моста.

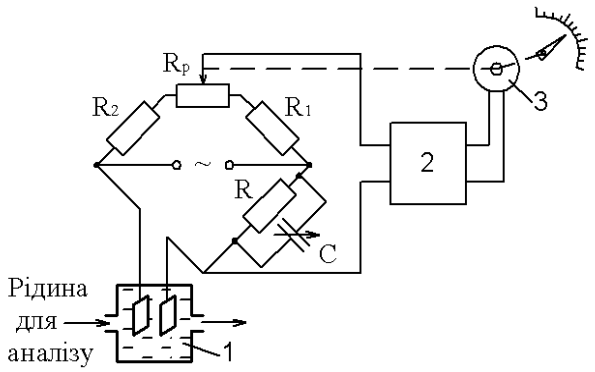


Рисунок 12.3 – Схема автоматичного кондуктоміра

Суміжне плече складається з опору R і змінної ємкості C, що служить для компенсації реактивної (ємкісної) складової вимірювальної комірки. Електронний підсилювач 2 та реверсивний двигун 3 служать для врівноваження моста шляхом зміни пліч від переміщення повзунка реохорда R_p. Такий кондуктометр може використовуватись тільки для постійної температури контрольної рідини. Якщо температура змінюється, то використовуються більш складні схеми з температурною компенсацією похибок вимірювання.

12.3 Принцип дії та класифікація оптичних аналізаторів речовин

Дія оптичних аналізаторів ґрунтується на використанні залежності зміни оптичних властивостей контрольної суміші від зміни концентрації компонента, що вимірюється.

Для вимірювання концентрацій використовується випромінювання практично всього спектру електромагнітних коливань, починаючи від радіохвиль і до γ-випромінювань. Найбільш широке застосування мають випромінювання інфрачервоної, видимої та ультрафіолетової областей спектру. Аналізатори, які працюють у цих областях спектру, називаються фотометричними. У аналізаторах використовуються явища поглинання, відбивання та розсіювання електромагнітного випромінювання речовиною, яка аналізується.

Поглинання (абсорбція) електромагнітного випромінювання кількісно описується законом Бугера – Ламберта – Бера:

$$I_\lambda = I_{0\lambda} e^{-k\delta} = I_{0\lambda} e^{-\varepsilon_\lambda \delta c}, \qquad (12.6)$$

де $I_{0\lambda}$ та I_λ – інтенсивність монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі λ, що входить у шар речовини, яка аналізується і виходить з нього (під інтенсивністю випромінювання вважається повний потік енергії випромінювання, що проходить за одиницю часу через одиницю площі і направлений до неї по нормалі);

k – показник поглинання випромінювання речовиною на довжині хвилі λ;
δ – товщина шару речовини;
c – концентрація поглинаючого компонента;
ε_λ – коефіцієнт, що залежить від довжини хвилі випромінювання.

Вираз (12.6) можна подати у вигляді:

$$\ln(I_{0\lambda} / I_\lambda) = \varepsilon_\lambda \delta c = D_\lambda , \qquad (12.7)$$

$$\ln(I_\lambda / I_{0\lambda}) = -\varepsilon_\lambda \delta c = T_\lambda . \qquad (12.8)$$

Величини D_λ та T_λ називають відповідно оптичною густиною або екстинцією (послабленням) та прозорістю (пропусканням) шару речовини товщиною δ на довжині хвилі λ. Якщо речовина, що аналізується є сумішшю декількох компонентів, які поглинають випромінювання на довжині хвилі λ, то оптична густина суміші буде сумою оптичних густин компонентів.

Аналізатори, засновані на явищі поглинання електромагнітного випромінювання, називаються абсорбційно-оптичними або абсорбційно-метричними. Аналізатори рідин та газів, основані на явищі поглинання електромагнітного випромінювання видимої частини спектру, називаються колориметрами або фотоколориметрами.

Гази або рідини, які включають різні частинки інших речовин, називаються дисперсними середовищами, наприклад, дим, туман, емульсія.

Аналізатори дисперсних середовищ, засновані на явищі розсіювання світла і зміні світлового потоку, що проходить через середовище, яке аналізується, називаються турбідиметрами. Аналізатори дисперсних середовищ, основані на явищі розсіювання світла і вимірюванні відбитого цим середовищем світлового потоку, називаються нефелометрами.

Спрощена схема абсорбційного оптичного аналізатора складу речовини, який працює на будь-якій довжині електромагнітних хвиль, приведена на рисунку 12.4.

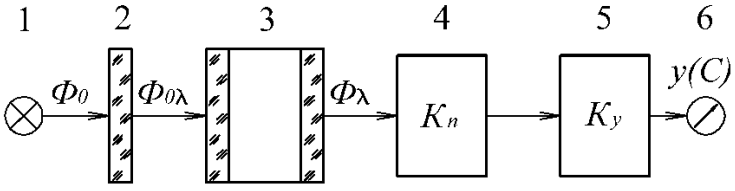


Рисунок 12.4 – Структурна схема спрощеного абсорбційно-оптичного аналізатора

Селективний оптичний фільтр 2 виконує функцію монохроматора і пропускає випромінювання $\Phi_{0\lambda}$ джерела 1 лише на вибраній довжині хвилі або у дуже вузькому інтервалі хвиль, що відповідає, як правило, максимальному коефіцієнту поглинання ε_λ компонента, що визначається. Фотоприймач 4 з лінійною характеристикою перетворює потік Φ_λ , що пройшов через кювету 3, у пропорційний електричний сигнал.

Інформативний сигнал $y(C)$, що вимірюється приладом 6 можна подати у вигляді:

$$y(C) = \Phi_0 s_\lambda T_\lambda(C) K_n K_y = U(1 - A_\lambda(C)), \qquad (12.9)$$

де s_λ – спектральна характеристика (пропускання) оптичного фільтра;

K_n – коефіцієнт перетворення фотоприймача;

K_y – коефіцієнт підсилення підсилювача 5;

$U = \Phi_0 s_\lambda K_n K_y$ – узагальнений параметр аналізатора.

Відношення (12.9) описує математичну модель спрощеного абсорбційно-оптичного аналізатора і є рівнянням його статичної характеристики. З відношення (12.9) випливає, що за $C = 0$ вихідний сигнал аналізатора досягне максимального рівня, а зі зростанням концентрації $y(C)$ буде зменшуватись по експоненті.

Чутливість аналізатора до зміни концентрації компонента:

$$S = dy(C)/dC = -U\varepsilon_\lambda e^{-\varepsilon_\lambda C}. \qquad (12.10)$$

Таким чином, чутливість S приладу зростає від збільшення параметрів Φ_0, s_λ, K_n, K_y та зменшується по експоненті зі збільшенням концентрації C.

12.4 Потенціометричний метод аналізу

Принцип дії потенціометричних аналізаторів, що належать до електрохімічних засобів вимірювання, оснований на вимірюванні потенціалу електрода, поміщеного в електроліт, за яким визначається концентрація певного компонента у речовині.

Потенціометричні аналізатори використовуються для вимірювання концентрації іонів у рідинах – іонометрія, для контролю окислювально-відновлювального (редокс) потенціалу – редоксметрія, а також у газовому аналізі.

Потенціометричний метод найбільш широко використовується для визначення активності іонів водню, що характеризує кислотні або лужні властивості розчинів.

Поява водневих іонів у розчині викликається тим, що частина молекул води завжди дисоціюють на іони водню та гідроксилу:

$$HOH \Leftrightarrow [H^+] + [OH^-]. \qquad (12.11)$$

Добуток концентрації іонів за постійної температури 22 °С – величина постійна і рівна:

$$[H^+] \cdot [OH^-] = 10^{-14}.$$

Якщо вираз прологарифмувати, отримаємо:

$$\lg[H^+] + \lg[OH^-] = -14,$$

звідси $\lg[H^+] = \lg[OH^-] = -7$, що відповідає нейтральній рідині.

Кислотність або лужність електролітів характеризується водневим показником *pH*:

$$pH = -\lg[H^+].$$

Згідно з цим, якщо *pH* = 7, то розчин нейтральний, якщо *pH* > 7 – лужний і якщо *pH* < 7 – кислотний.

Розглянуті залежності строго справедливі тільки для не дуже великих концентрацій. У концентрованих розчинах необхідно вводити поправочний множник – коефіцієнт активності *f*, який, як правило, менший одиниці.

Таким чином, уточнена формула водневого показника буде мати вигляд:

$$pH = -\lg a_H = -\lg(f_H[H^+]), \qquad (12.12)$$

тобто, водневий показник рівний від'ємному логарифму активності водних іонів.

Зручність використання водневого показника привело до введення аналогічного показника *pX*, що використовується для вираження активної концентрації найрізноманітніших іонів у потенціометричних вимірюваннях з використанням іоноселективних електродів. У потенціометричному визначенні окислювально-відновлювальних властивостей рідких речовин використовується також поняття *eH*.

12.5 Порівняльні та вимірювальні електроди

Електродний потенціал вимірюють непрямим шляхом за величиною ЕРС гальванічного елемента, до якого входять вимірювальний (індикаторний) електрод 1 та порівняльний (допоміжний або опорний) електрод 2 (рис. 12.5). Обидва електроди занурені в електроліт, що досліджується, наприклад, в рідину, яка аналізується, що перетікає через комірку 3.

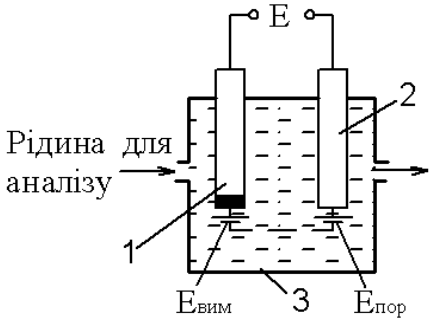


Рисунок 12.5 – Схема гальванічного елемента (комірки) потенціометричних аналізаторів

Потенціал вимірювального електрода $E_{вим}$ змінюється якщо змінюється концентрація іонів у рідині, а потенціал порівнювального електрода $E_{пор}$ залишається постійним, так як він не залежить від концентрації іонів. ЕРС такого гальванічного елементу *E* визначається різницею потенціалів електродів:

$$E = E_{вим} - E_{пор}. \qquad (12.13)$$

За постійного потенціалу $E_{пор}$, вимірювання цієї ЕРС дозволяє отримати інформацію про концентрацію іонів, які визначаються в рідині або про її окислювально-відновлювальні властивості.

У якості вимірювальних електродів застосовуються водневий, хінгідронний, сурм'яний та скляний. Для вимірювання величини *pH* у розчинах з температурою до 100 °С найчастіше використовується скляний електрод.

Скляний електрод (рис. 12.6) – це тонкостінна колбочка 1, виконана із спеціальних сортів скла. Товщина стінки кулястої частини колбочки становить 0,05 – 0,1 мм. Колбочка заповнена контрольним розчином 2 будь-якої солі і кислоти з відомим *pH*.

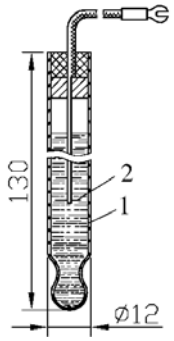


Рисунок 12.6 – Вимірювальний скляний електрод pH-метра

Якщо колбочку занурити у розчин, то на межі скло-розчин появляється потенціал, який залежить від концентрації у розчині іонів H^+, тобто скляний електрод проявляє себе як водневий. Причиною виникнення потенціалу на межі скло-розчин є іонний обмін між розчином та склом. На поверхневому шарі скла проходить обмінне витіснення лужних іонів скла іонами водню до встановлення динамічної рівноваги.

Принципово однаково, яка з поверхонь кульки – внутрішня чи зовнішня використовується для зняття потенціалу. Так як проміжний шар скла між обома поверхнями за суттю є провідником, тому вимушено використовуються обидві поверхні колбочки.

У широкому діапазоні *pH*, приблизно від 0 до 10, для скляного електрода справедлива така ж лінійна залежність між потенціалом та величиною *pH*, як і для водневого електрода, і тільки для дуже великих значень *pH* лінійна залежність дещо порушується.

Матеріал для скла електрода вибирається у залежності від діапазону *pH* від 0 до 14,5. Скляний електрод є найбільш універсальним, так як дає можливість вимірювання будь-яких значень *pH* у розчинах будь-якого хімічного складу.

На відміну від індикаторного електрода, потенціал якого функціонально пов'язаний з активністю іонів у розчині, потенціал допоміжного електрода повинен завжди залишатись постійним.

У якості допоміжних електродів переважно застосовуються хлоросрібний і каломельний.

Хлоросрібний електрод виготовляється зі срібного стержня, на поверхні якого осаджений шар малорозчинної солі AgCl. Після занурення у розчин, що містить іони хлору, електрод приймає потенціал, величина якого є функцією активності іонів хлору.

Каломельний електрод (рис. 12.7) – це ємкість 2, на дні якої знаходиться шар 5 чистої металевої ртуті, покритий шаром 4 малорозчинної пасти каломелі (Hg_2Cl_2). Решта об'єму ємкості заповнена розчином 3 хлористого калію. Для контакту з ртуттю у дно ємкості впаяний платиновий контакт 6. Врівноважений потенціал цього електрода залежить тільки від активності хлору у розчині, яка визначається головним чином концентрацією солі KCl.

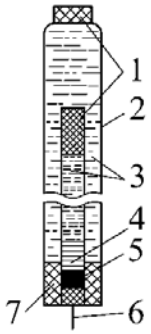


Рисунок 12.7 – Допоміжний каломельний електрод pH-метра

На практиці використовуються каломельні електроди з насиченим розчином хлористого калію, бо у цьому випадку легко підтримувати постійну концентрацію іонів хлору.

У всіх конструкціях каломельних допоміжних електродів контакт з розчином здійснюється через розчин хлористого калію, що забезпечує електролітичний контакт. У місці дотику контрольного розчину з електролітичним контактом встановлюються пористі перегородки 1, через які розчин хлористого калію поступово просочується у контрольний розчин. Електрод закритий пробкою 7.

12.6 Вимірювальні схеми pH-метрів

Специфічні особливості електродної системи зі скляним індикаторним електродом, і, зокрема, високий внутрішній електричний опір скляного електрода висувають ряд вимог до приладів, призначеним для роботи у комплекті з електродними системами. Найважливіші з цих вимог – високий вхідний опір приладу – не менше 10^{12} Ом, та мізерно мала сила струму, що протікає через електродну систему під час вимірювання – менше 10^{-12} А.

Наведеним вимогам відповідають тільки спеціальні високоомні прилади, основним елементом яких є підсилювач постійного струму. Сучасні високоомні прилади, які використовуються для вимірювання *pH*, призначені для роботи з перетворювачами, внутрішній опір яких може мати до 10^9 Ом. У цьому випадку вхідний опір приладу щонайменше у 1000 разів більше опору перетворювача, що забезпечує практично відсутність похибок, пов'язаних з протіканням струму через

електродну систему.

За принципом дії pH-метри можна поділити на три групи: прилади з безпосереднім відліком, прилади з астатичною компенсацією, прилади зі статичною компенсацією.

У потенціометричному аналізаторі (рис. 12.8), який включає вимірювальну комірку 3 з вимірювальним 1 та порівняльним 2 електродами, вимірювання сигналу здійснюється за допомогою автоматичного потенціометра з реохордом R_p, який живиться від джерела постійного струму 4.

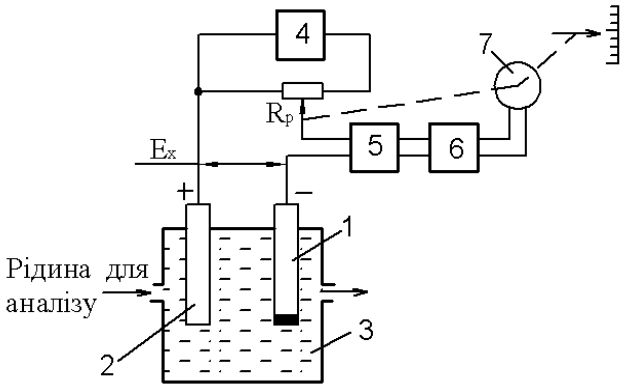


Рисунок 12.8 – Схема потенціометричного аналізатора рідини

У вимірюванні сигнал гальванічної комірки порівнюється зі спадом напруги на реохорді. Відмінність цього потенціометра полягає у тому, що крім підсилювача змінного струму 6, реверсивного двигуна 7 та інших вузлів він додатково включає електрометричний підсилювач 5, що має вхідний опір 600 МОм.

Електродний потенціал скляного електрода під час вимірювання змінюється в залежності від температури розчину. Внаслідок цього одній і тій же величині *pH* за різних температур розчину відповідають різні значення е.р.с. електродної системи. Залежність е.р.с. електродної системи від *pH* і температури виражається сімейством прямих, що пересікаються в одній точці.

Корекція показів pH-метра від зміни температури можна виконувати як вручну, так і автоматично за допомогою компенсаційних схем.

Контрольні питання

1. Чим зумовлюється провідність електролітів та газів?
2. Як впливає на вимірювання концентрація та температура розчинів?
3. Як конструктивно виконуються чутливі елементи кондуктометрів?
4. Чому вимірювання провідності рідин виконується змінним струмом?
5. Яка вимірювальна схема використовується у автоматичних кондуктометрах?
6. До якої групи приладів належать потенціометричні аналізатори?
7. Чим виконується вимірювання електродного потенціалу електроліту?
8. У чому полягає проблема вимірювання е.р.с. електродної системи?
9. Який фізичний параметр найбільше впливає на точність pH-метрів?

ТЕМА 13
ВИМІРЮВАННЯ СКЛАДУ ГАЗІВ

План

13.1 Методи та засоби вимірювання складу газових середовищ.
13.2 Дифузійні аналізатори.
13.3 Магнітні аналізатори.
13.4 Сорбційні аналізатори.
13.5 Іонізаційні та полум'яно-іонізаційні газоаналізатори.
13.6 Термохімічні та хемілюмінесцентні аналізатори.
13.7 Фотометричні аналізатори видимого випромінювання.
13.8 Оптико-акустичні аналізатори.

13.1 Методи та засоби вимірювання складу газових середовищ

Вимірювання концентрації окремого компонента у бінарних та псевдобінарних сумішах рідин і газів – одна з найпоширеніших задач автоматичного контролю якості потоків хіміко-технологічних процесів. Для її вирішення використовуються всі можливі методи фізичного, фізико-хімічного та хімічного аналізів. У загальному випадку вимірювання концентрації окремого компонента у бінарній суміші здійснюється шляхом вимірювання якоїсь фізико-хімічної властивості цієї суміші та виконання обчислень, необхідних для розв'язання системи рівнянь.

У теплоенергетичних установках переважно виникає необхідність вимірювання вмісту CO_2, CO, H_2, O_2, CH_4 у газових сумішах.

Згідно з прийнятою у свій час класифікацією автоматичні газоаналізатори можна поділити на:

1) механічні:

а) статистичні газоаналізатори, основані на використанні хімічних реакцій (об'ємні), манометричні, об'ємно-манометричні, вагові – диференціальні та поплавкові;

б) динамічні газоаналізатори – відцентрові та ефузійні (густиномірні, віскози метричні);

2) звукові і ультразвукові:

а) основані на вимірюванні швидкості поширення звуку у неперервному режимі – амплітудно-резонансні, фазові;

б) основані на вимірюванні швидкості поширення звуку в імпульсному режимі;

3) теплові:

а) термокондуктометричні, основані на зміні теплопровідності;

б) термохімічні – з реакцією у рідкій фазі і з реакцією у газовій фазі;

4) магнітні:

а) термомагнітні, основані на зміні термомагнітної конвекції;

б) магнітотермокондуктометричні, основані на зміні теплопровідності в

магнітному полі;

в) магнітовіскозиметричні, основані на зміні в’язкості в магнітному полі;

г) магнітомеханічні;

5) електрохімічні:

а) амперметричні – гальванічні, деполяризаційні;

б) потенціометричні, включно з титроматичними;

в) кулонометричні;

г) кондуктометричні – електродні і безелектродні;

6) іонізаційні, основані на збільшенні або зменшенні іонного струму;

7) оптичні:

а) абсорбційні;

б) емісійні;

в) інтерферометричні.

Окрім наведених, все більшого поширення отримують мас-спектрометри, основані на використанні різниці мас молекул і атомів різних речовин, та хроматографи, у яких проходить розділення складних газових сумішей шляхом використання різниці у швидкостях руху компонентів по шару сорбента. Слід відмітити, що ступінь універсальності вказаних методів суттєво відрізняється.

13.2 Дифузійні аналізатори

Принцип дії дифузійних газоаналізаторів основується на процесі переносу речовини – компонента суміші, під дією градієнта його концентрації. Цей перенос може відбуватися під час дотику речовин однієї з іншою – дифузія, або через тверду речовину – трансфузія або проникнення. Процес переносу пов’язаний з хаотичним тепловим рухом молекул, що відбувається в напрямку зменшення концентрації речовини і приводить до рівномірного розподілу по займаному об’єму. Проникнення через тверде тіло визначається наявністю розривів у їх кристалічній решітці, нерегулярних щілин та пор у макроструктурі твердої речовини або розчиненням газів та парів у твердій речовині. Найшвидше процес переносу речовини під дією градієнта концентрації відбувається у газах, що визначає пріоритетне використання цього явища для автоматичного контролю концентрації газів.

Інтенсивність взаємного проникнення двох газів визначається коефіцієнтом їх взаємної дифузії, яка залежить від молекулярних мас цих газів і полярності їх молекул. Коефіцієнт взаємного проникнення збільшується із збільшенням температури та зменшується зі збільшенням тиску.

При дифузії газу через мембрану з твердої пористої речовини за умови відповідності довжини вільного пробігу молекул з діаметром пор коефіцієнт дифузії обернено пропорційний квадратному кореню із молекулярної маси газу.

Коефіцієнти дифузії через непористі матеріали, наприклад, кварц, скло, метали, полімери, які використовуються у якості мембран, індивідуальні для різних газів і залежать від механізму проникнення. У багатьох важливих для аналітичного контролю випадках можна вважати, що кожен компонент газової суміші проникає через мембрану незалежно від інших компонент.

У газоаналізаторі (рис. 13.1) камери 2 і 1 розділені тонкою (10-20 мкм) мембраною із сплаву паладію з сріблом.

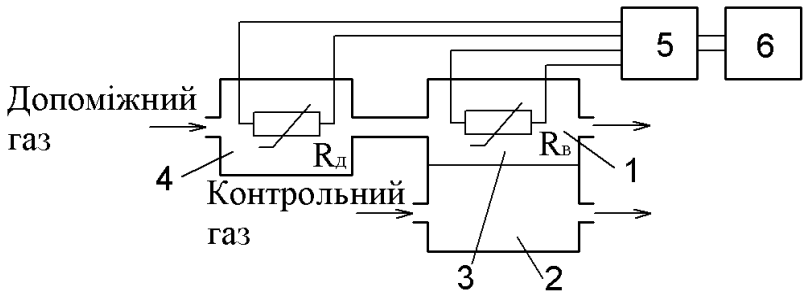


Рисунок 13.1 – Схема дифузійного газоаналізатора

Аналітичний пристрій аналізатора термостатується за температури 45°С. Через камеру 2 з постійними об'ємними витратами прокачується контрольний газ, що містить водень, а через камеру 1 – допоміжний газ, наприклад повітря або азот, який попередньо проходить через камеру 4. У камері 1 розміщений вимірювальний $R_в$, а у камері 4 – порівняльний $R_Д$ терморезистори. Ці терморезистори підключені до неврівноваженого моста 5 і утворюють термокондуктометричний детектор.

Під час роботи аналізатора через мембрану із камери 2 у камеру 1 дифундує тільки водень, який добавляється до допоміжного газу і змінює теплопровідність газового потоку, що омиває вимірювальний терморезистор $R_в$. Це викликає зміну сигналу неврівноваженого моста 5, сигнал з якого вимірюється і реєструється самописним потенціометром 6.

Коли потік газу, що проникає через мембрану, малий – 2-3% заг. від витрат допоміжного газу, сигнал аналізатора описується рівнянням:

$$U = k_\lambda \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_в} \right) \frac{D_M S}{\delta Q_в} c_0 = K_D c_0 , \qquad (13.1)$$

де D_M – коефіцієнт дифузії через мембрану компонента, який визначається;

S і δ – площа і товщина мембрани;

λ – теплопровідність газу, який проникає через мембрану;

$K_D = k_\lambda \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_в} \right) \frac{D_M S}{\delta Q_в}$ – коефіцієнт перетворення аналізатора.

Вираз (13.1) свідчить про те, що сигнал аналізатора однозначно визначається концентрацією водню у багатокомпонентній газовій суміші. Аналізатор забезпечує селективне вимірювання концентрацій водню, дейтерію та гелію у діапазонах від 0-1 до 0-100% заг., має клас точності 3 і час реакції 10-15 с. Крім паладієвих мембран для селективних вимірювань можуть використовуватись тонкі (5-20 мкм) плівки із різних полімерних матеріалів.

13.3 Магнітні аналізатори

В основу роботи магнітних газоаналізаторів покладені різні явища, пов'язані із взаємодією компонентів газової суміші з магнітним полем.

Гази, які втягуються в магнітне поле, називаються парамагнітними, а ті гази, які виштовхуються із магнітного поля – діамагнітними. Кількісно магнітні властивості газів визначаються величиною, яка називається магнітним сприйняттям. Ця величина для парамагнітних та діамагнітних газів описується виразами:

$$\chi_п = \frac{c_K \mu P}{RT^2}, \tag{13.2}$$

$$\chi_д = \frac{\chi_Д \mu P}{RT^2}, \tag{13.3}$$

де $\chi_п$ і $\chi_д$ – об'ємні магнітні сприйняття парамагнітних та діамагнітних газів;

c_K – постійна Кюрі;

μ – молекулярна маса;

P і T – абсолютний тиск і температура;

R – універсальна газова постійна;

$\chi_Д$ – питоме магнітне сприйняття діамагнітного газу.

У термомагнітному аналізаторі газ, що підлягає аналізу, з блоку підготовки 1 надходить у кільцеву камеру 3 (рис. 13.2). По діаметру цієї камери встановлена тонкостінна скляна трубка 4 з намотаними на ній терморезисторами теплового витратоміра R_1 і R_2. Якщо у контрольному газі відсутній кисень, то за горизонтального положення трубки 4 потік газу через неї не проходить.

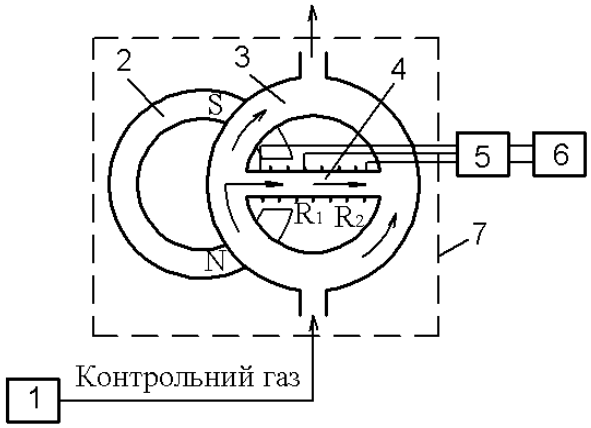


Рисунок 13.2 – Схема термомагнітного газоаналізатора

Якщо в контрольному газі є кисень, він втягується в магнітне поле, що створюється постійним магнітом 2 навколо лівого (за рисунком) кінця трубки 4. Потім кисень нагрівається терморезистором R_1 до температури вище точки Кюрі (~80°С), за якої він втрачає парамагнітні властивості, стає діамагнітним і виштовхується з магнітного поля. Виникає «магнітний вітер» – потік газу в трубці

4. Витрати газу в трубці 4 вимірюються тепловим витратоміром. Розбаланс неврівноваженого моста 5, що визначається об'ємною концентрацією кисню в контрольному газі, вимірюється і реєструється потенціометром 6. Аналітичний пристрій 7 аналізатора термостатується за температури 45°С.

Діапазони вимірювання термомагнітного газоаналізатора від 0-1 до 0-100% заг.; клас точності 2,5-5 в залежності від діапазону вимірювання, час реакції 120 с.

13.4 Сорбційні аналізатори

В основу роботи сорбційних газоаналізаторів покладено різні ефекти, що супроводжують процес сорбції – поглинання твердим тілом або рідиною речовини з зовнішнього середовища. Це явище давно використовується в аналітичному контролі. Так, широко поширені волосяні вологоміри повітря, у яких сигнал вимірювальної інформації формується за рахунок зміни довжини волосини від зміни вологості повітря.

У сорбційних газоаналізаторах використовуються механічні, теплові, оптичні та електричні ефекти, що супроводжують процес адсорбції газів та парів. У дилатометричному газоаналізаторі (рис. 13.3), призначеному для вимірювання концентрації водню, в камері 2, через яку прокачується контрольний газ, розміщена тонкостінна трубка 1, виготовлена з палладію.

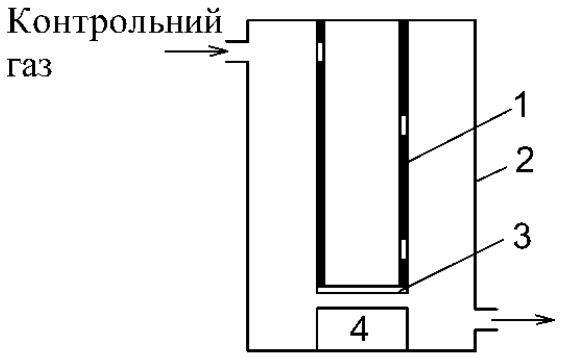


Рисунок 13.3 – Схема сорбційного газоаналізатора з дилатометричною трубкою

Водень, що входить в контрольний газ розчиняється в палладії і трубка набухає та збільшує свою довжину. Верхній кінець трубки 1 закріплений на корпусі 2, а тому її нижній кінець переміщується. За допомогою ємнісного або індуктивного перетворювача переміщення 4 вимірюється переміщення пластини 3, закріпленої на нижньому кінці трубки. Це переміщення буде функціонально пов'язаним з концентрацією водню у контрольному газі.

Відомі сорбційні дилатометричні (принцип перетворення – видовження електрода) газоаналізатори призначені для вимірювання концентрації пропану, бутану, двоокису вуглецю та інших технічних газів, у яких використовується стержень виготовлений з адсорбенту – активованого вугілля, алюмогелю, силікагелю.

Існує велика кількість конструкцій сорбційно-кондуктометричних газоаналізаторів. У них використовуються плівкові, діодні, тріодні чутливі

елементи та чутливі елементи у вигляді гранул. У якості матеріалів у напівпровідникових плівкових чутливих елементах використовують в основному оксиди металів SnO_2, Nb_2O_5, CoO, ZnO, ZrO_2, TiO_2, а також германій та кремній.

На схемі (рис. 13.4) показано схему газоаналізатора з плівковим чутливим елементом. У якості плівки 2 використовується оксид цинку, нанесений на боросилікатну підкладку. Товщина плівки 20 – 1000 А, розміри її 20 х 4 мм. Через нанесені на неї контакти 3 плівка підкладки підключається до вимірювальної схеми. Під час протікання через камеру 1 контрольного газу, компонент, який визначається, сорбується на плівці і змінює його електричний опір.

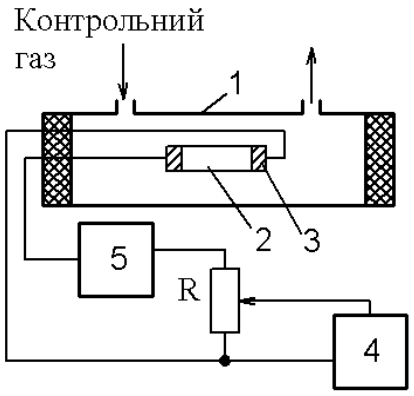


Рисунок 13.4 – Схема сорбційного газоаналізатора з провідною плівкою

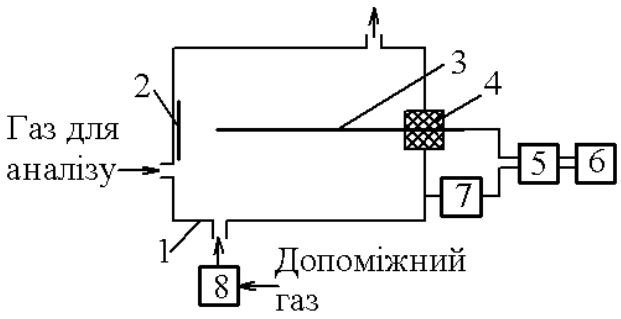
Речовини, наділені донорними властивостями збільшують електропровідність, а речовини з акцепторними властивостями – зменшують її. Сигнал аналізатора визначається струмом, що створюється в колі стабілізованим джерелом 5, який перетворюється в уніфікований сигнал високоомним перетворювачем 4. Для отримання високої чутливості плівку нагрівають до температури 200-400 °С.

13.5 Іонізаційні та полум’яно-іонізаційні газоаналізатори

Принцип дії іонізаційних аналізаторів полягає в іонізації газу, який аналізується та у вимірювання іонного струму. У практиці аналітичного контролю знаходять застосування в основному, іонізаційні газоаналізатори, які розрізняються за способом іонізації газу, що аналізується: іонізація радіоактивних випромінювань, фотоіонізація, поверхнева іонізація, іонізація у тліючому розряді тощо.

У схемі аерозольно-іонізаційного газоаналізатора використовується хімічна реакція (рис. 13.5).

Цей аналізатор включає пристрій 8, у якому допоміжний газ (переважно, повітря) насичується парами реагенту, що служить для утворення аерозолю. Газовий потік із пристрою 8 поступає у камеру 1, де змішується з потоком контрольного газу. Утворена у результаті хімічної реакції компоненту, що визначається, та парів реагенту аерозоль змінює іонний струм в іонізаційній



камері.

Рисунок 13.5 – Аерозольно-іонізаційний аналізатор: 1 – іонізаційна камера; 2,3 – електроди; 4 – ізолятор; 5 – електрометричний перетворювач; 6 – потенціометр; 7 – стабілізоване джерело живлення (100 – 300 В)

Аерозольно-іонізаційні аналізатори використовуються для контролю концентрацій мікродомішок шкідливих речовин, включно оксидів азоту, хлористого водню, аміаку, амінів. Діапазони вимірювання аналізаторів від 0-0,5 до 0-50 мГ/м^3.

Явище поверхневої іонізації використовується в роботі аналізатора, схема якого показана на рисунку 13.6.

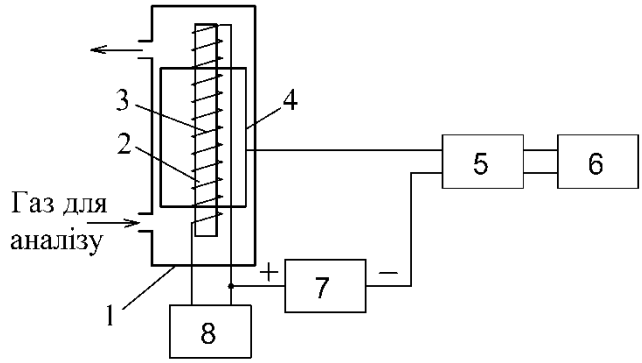


Рисунок 13.6 – Аналізатор з поверхневою іонізацією

Газ для аналізу поступає в камеру 1 з постійними і стабільними об’ємними витратами. У цій камері розміщені керамічний пористий циліндр 2, на якому намотана платинова нитка 3, яка нагрівається струмом джерела 8 до 800-1000 °С. Ця нитка служить анодом. У якості катоду служить платиновий циліндр 4. Між анодом і катодом прикладена напруга 50-500 В від джерела 7. Віддаль між електродами 1-2 мм. Іонний струм між електродами визначається в основному емісією лужноземельних металів від розігріву платинової нитки. Для забезпечення стабільності роботи керамічний циліндр 2 попередньо насичують їдким калієм – КОН.

Газоаналізатор, дія якого основана на поверхневій іонізації, має підвищену селективну чутливість до галогенних з’єднань, збільшення концентрації яких у газі приводить до зростання іонного струму. Значення іонного струму перетворюється електрометричним перетворювачем 5 в уніфікований електричний сигнал, що передається на потенціометр 6. Такі газоаналізатори використовуються переважно для виявлення місця витоку фреонів різних марок у

холодильній апаратурі.

Полум'яно-іонізаційний метод аналізу застосовують як для визначення органічних мікродомішок на рівні токсичних концентрацій, так і для контролю вибухонебезпечних газових сумішей.

Дія полум'яно-іонізаційних газоаналізаторів (рис. 13.7) основана на явищі іонізації органічних речовин у водневому полум'ї.

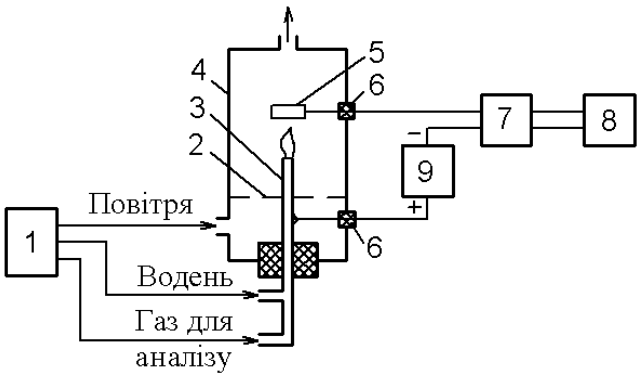


Рисунок 13.7 – Схема полум'яно-іонізаційного газоаналізатора

Перетворювач газоаналізатора – це водневий пальник, поміщений у електричне поле.

У полум'яно-іонізаційному аналізаторі газ для аналізу та водень для підтримки полум'я, подаються із блока підготовки газів 1 у мініатюрний пальник 3. Пальник встановлений у корпусі 4 на ізоляторі 6.

Повітря, яке необхідне для горіння водню, поступає у камеру 4 через розподільник 2. Над горілкою на фторопластовому ізоляторі 6 встановлено колекторний електрод 5 з платини або ніхрому. Між горілкою 3 і колекторним електродом 5 прикладається електричне поле від джерела 9 напруженістю 150-200 В/см. Від згоряння чистого водню іони майже не утворюються, а опір водневого полум'я близько 10^{16} Ом. Органічні речовини (гази й пари), що є у газі для аналізу, попадаючи у водневе полум'я, згоряють і викликають різке збільшення іонного струму. Цей струм перетворюється в уніфікований сигнал перетворювачем 7 з великим вхідним опором (10^8-10^9 Ом), а сигнал останнього сприймається автоматичним потенціометром 8.

13.6 Термохімічні та хемілюмінесцентні аналізатори

Принцип дії термохімічних аналізаторів полягає у використанні теплового ефекту хімічної реакції, яка протікає між компонентом суміші, який повинен бути визначений, та допоміжним реагентом. Сигналом вимірювальної інформації у термохімічних аналізаторах служить температура, значення якої залежить від теплового ефекту хімічної реакції. Для створення термохімічних аналізаторів використовуються хімічні реакції окислення на каталітично активній поверхні, у полум'ї і у газових потоках.

У термохімічному аналізаторі (рис. 13.8) газ, що аналізується, ежектором (струменевим насосом) 3 прокачується через кран 10 у камеру 1.

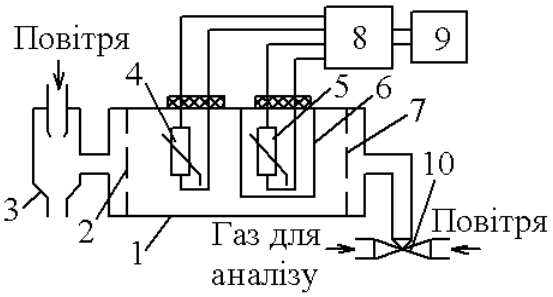


Рисунок 13.8 – Схема термохімічного газоаналізатора

У камері розміщені вибухозагороджувальні сітки 2 і 7, вимірювальний 4 та порівняльний 5 чутливі елементи. Порівняльний елемент закритий ковпачком 6 і служить для усунення впливу змін навколишньої температури на сигнал газоаналізатора. У якості чутливих елементів у цих газоаналізаторах використовуються платинові дротики з активованою поверхнею або пеллістори. Пеллістор – платиновий дротик діаметром 0,03-0,05 мм, поміщений у кульку або циліндр із окису алюмінію, покритий шаром платино-паладієвого каталізатора.

Чутливі елементи нагріваються струмом неврівноваженого моста 8 до температури 200-500°С. Під час згоряння на поверхні чутливого елементу газу, який аналізується, температура елементу збільшується, що призводить до збільшення опору платинового дротика, а це, в свою чергу, викликає розбаланс електричного моста, що вимірюється вторинним приладом 9 та описується виразом:

$$\Delta U = k_1 \psi Q_н c = Kc, \qquad (13.4)$$

де k_1 – постійний коефіцієнт для неврівноваженого моста;

$K = k_1 \psi Q_н$ – коефіцієнт перетворення аналізатора.

Для перевірки та коректування нульового значення сигналу газоаналізатора через кран 10 у камеру 1 може бути направлене повітря, яке не включає горючих компонентів.

Принцип дії хемілюмінесцентних газоаналізаторів (рис. 13.9) заснований на явищі люмінесценції, яке супроводжує деякі хімічні реакції.

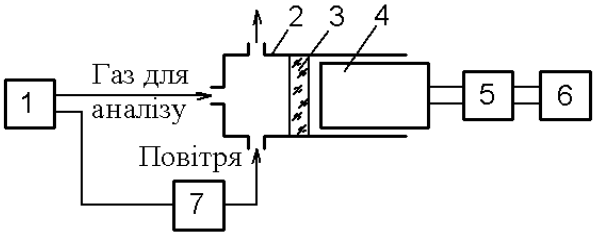


Рисунок 13.9 – Схема хемілюмінесцентного газоаналізатора

У хемілюмінесцентному газоаналізаторі газ, який аналізується і повітря із блоку підготовки газів 1 у реакційну камеру 2. Повітря попередньо проходить через озонатор 7, де під дією бар'єрного високовольтного розряду у повітрі

утворюється озон.

Від взаємодії у камері 2 озону з компонентом, що визначається із суміші утворюються продукти реакції у збудженому стані. Під час переходу їх у стійкий стан відбувається випромінювання квантів люмінесценції. Електромагнітне випромінювання через вікно 3 попадає у фотопомножувач 4, сигнал якого перетворюється в уніфікований сигнал з допомогою перетворювача 5. Вихідний сигнал сприймається потенціометром 6.

13.7 Фотометричні аналізатори видимого випромінювання

Схемні та конструктивні вирішення аналізаторів, в роботі яких використовується випромінювання видимої частини спектру, досить різноманітні. Колориметричні аналізатори класифікуються в залежності від кількості джерел та приймачів випромінювання, кількості використовуваних променів та наявності попереднього перетворення речовини, яка аналізується.

Колориметричний аналізатор (рис. 13.10) має одне джерело освітлення – лампа 1, та два приймачі випромінювання – фотоелементи 6 і 9 і є двопроменевим.

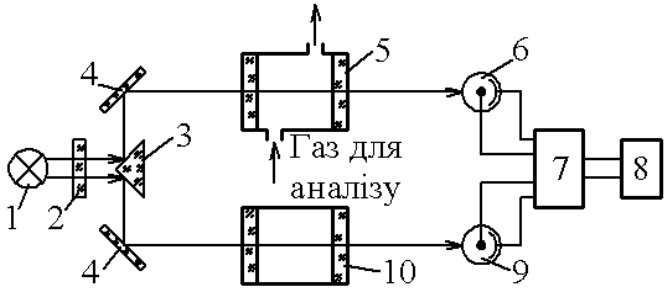


Рисунок 13.10 – Схема фотометричного аналізатора видимого випромінювання

Випромінювання, що виходить з джерела 1, проходить фільтр 2 і розділяється на два промені, які через дзеркала 4 поступають у вимірювальну 5 та порівняльну 10 кювети. Через вимірювальну кювету прокачується речовина, що аналізується, а порівняльна заповнюється зразковою речовиною з відомою або рівною нулю концентрацією компонента, який визначається. Фотоелементи 1 і 9 включені на вхід підсилювача 7 зустрічно, тому різниця цих сигналів, перетворена підсилювачем в уніфікований сигнал, однозначно залежить від концентрації компонента в речовині для аналізу. Вихідний сигнал підсилювача 7 вимірюється та реєструється вторинним приладом 8.

На рисунку 13.11 показано схему турбідиметричного аналізатора вмісту частинок сажі у димових газах – димомір. Джерело 1 та приймач випромінювання 3 розташовані напроти один одного поза трубою 2, щоб зменшити забруднення скляних вікон. Сигнал приймача випромінювання сприймається вторинним приладом 4. Шкала вторинного приладу розділена на декілька поділок, що характеризують ступінь забруднення димових газів. За постійної швидкості руху газового потоку, розмірах і густині мікрочастинок шкала вторинного приладу може бути відкалібрована у масових або об’ємних концентраціях.

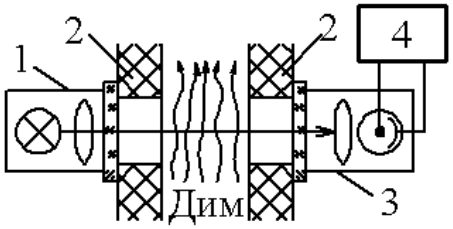


Рисунок 13.11 – Схема турбідиметричного аналізатора

13.8 Оптико-акустичні аналізатори

Дія оптико-акустичних аналізаторів ґрунтується на вимірюванні ступеня поглинання газом переривистого потоку інфрачервоної радіації. Випромінювання інфрачервоної області спектру поглинаються газами, молекули яких складаються двох або більше різних атомів та іонів. Практично ці газоаналізатори використовуються для вимірювання концентрації CO_2, CO, CH_4.

Оптико-акустичний ефект полягає у наступному: від дії на газ, який знаходиться у замкнутому об'ємі, переривистим потоком інфрачервоної радіації відбувається пульсація температури, а відповідно, і тиску цього газу. Ця пульсація сприймається мікрофоном і перетворюється в інформаційний сигнал.

На рис. 13.12 наведено принципову схему оптико-акустичного аналізатора. Інфрачервоне випромінювання від двох джерел 1 направляється по двох каналах – робочому та порівняльному, проходить через обтюратор 2, який шість разів за секунду перериває обидва потоки одночасно. Переривисті потоки випромінювання проходять через фільтрові камери 3, заповнені тією сумішшю газу, з якої виключений компонент, що аналізується. Наявність фільтрових камер забезпечує зменшення похибки за рахунок можливого часткового накладання спектрів поглинання складових речовини: тієї, що аналізується і тієї що не аналізується.

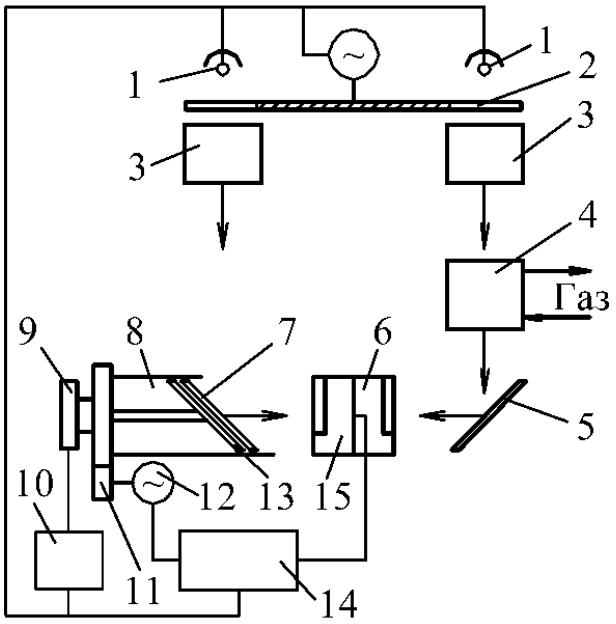


Рисунок 13.12 – Принципова схема оптико-акустичного аналізатора

Далі потік випромінювання, направлений по робочому каналу, проходить робочу камеру 4, через яку безперервно прокачується газова суміш, що аналізується. Складова газу, яка визначається, поглинає частину енергії, в залежності від характеристичної здатності поглинання цього газу. Залишок променевої енергії після відбиття від пластини 5 поступає у праву частину приймача 6. Променевий потік, який проходить по порівняльному каналу, після фільтрової камери 3 попадає у компенсаційну камеру 8. Компенсаційна камера заповнена складовою суміші, що аналізується. На поверхні цієї камери вмонтовано вікна із спеціального скла (Li+F) 7, які вільно пропускають інфрачервоні промені. Всередині компенсаційної камери встановлено дзеркало 13, яке направляє променевий потік у ліву частину приймача 6.

Якщо у ліву і праву частини приймача променевої енергії 6 поступають різні за величиною переривисті потоки випромінювання, то конденсаторний мікрофон 15, вмонтований у приймачі, створює звуковий сигнал, який після підсилення підсилювачем 14 діє на реверсивний двигун 12.

Реверсивний двигун за допомогою редуктора 11 переміщує дзеркало 13 до того часу, доки потік порівняльного каналу не урівняється з потоком, що поступає в приймач робочим каналом. У момент рівності потоків звучання мікрофона припиняється. Переміщення дзеркала 13 всередині зрівнювальної камери приводить до зміни її об’єму, тобто, до зміни довжини шляху проходження газу, що викликає зміну поглинання променевої енергії. Одночасно з редуктором переміщується движок реохорда 9 вторинного приладу 10.

Такого типу газоаналізатори випускаються для діапазонів від 0 – 1% до 0 – 100% по об’єму компонента, що аналізується. Основна похибка лежить в межах від ±2,5 до±5 % від верхньої границі вимірювання.

Контрольні питання

1. Що таке дифузія та трансфузія речовин?
2. Для чого виконується термостатування дифузійного газоаналізатора?
3. Як називаються гази, які взаємодіють з магнітним полем?
4. Що є інформативним сигналом термомагнітного аналізатора?
5. Яке фізичне явище використовується у сорбційних аналізаторах?
6. З якого матеріалу виготовляється трубка дилатометричного сорбційного газоаналізатора?
7. Яке основне призначення газоаналізаторів з поверхневою іонізацією?
8. Що служить інформаційним сигналом у термохімічних аналізаторах?
9. На чому ґрунтується дія хемілюмінесцентних аналізаторів?
10. Для аналізу яких газів використовуються оптико-акустичні прилади?

ТЕМА 14
ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ

План

14.1 Вологість газів.
14.2 Методи вимірювання вологості газів.
14.3 Психрометричний метод вимірювання вологості газів.
14.4 Випаровувальні аналізатори.
14.5 Конденсаційні аналізатори.
14.6 Вимірювання вологості твердих тіл і сипких речовин.

14.1 Вологість газів

Концентрацію парів рідин у газах прийнято характеризувати абсолютною або відносною вологістю.

Абсолютна вологість визначається як маса парів рідини в одиниці об'єму сухого або вологого газу в нормальних умовах.

Абсолютна вагова вологість A – маса водяної пари, вміщеної в одиниці об'єму парогазової суміші.

Абсолютна об'ємна вологість A_v виражається в об'ємних відсотках для малих концентрацій. Цю одиницю позначають ppm об'ємних, тобто «міліонна частка за об'ємом» (1 ppm об'ємн. = $1 \cdot 10^{-4}$ % об'ємн.).

Відносна вологість або ступінь насичення газу парами рідини, визначається як відношення маси парів в одиниці об'єму до максимально можливої маси парів в одиниці об'єму за тієї ж температури, вираженої в %:

$$\varphi = \frac{A}{A_н} \cdot 100, \qquad (14.1)$$

де A – значення абсолютної вологості газу за даної температури;

$A_н$ – максимально можливе значення абсолютної вологості за даної температури, що відповідає насиченню.

Для температури $T > 100$°C і тиску $P = 760$ мм. рт. ст. гранична кількість водяної пари, що міститься у 1 м^3 газопарової суміші, відповідає густині пари, бо у цьому випадку замість суміші буде тільки пара:

$$\varphi = \frac{\rho_п}{\rho_{п.\max}}, \qquad (14.2)$$

де $\rho_п$ – густина пари.

У процесах сушки використовується термін вміст вологи d, під яким приймається вміст водяної пари у пароповітряній суміші, що припадає на одиницю маси сухого повітря:

$$d = 1000\frac{\rho_n}{\rho_c}. \qquad (14.3)$$

14.2 Методи вимірювання вологості газів

Вимірювання вологості газів може виконуватись наступними методами:

1. Психрометричний метод ґрунтується на залежності швидкості випаровування вологи у зовнішнє середовище від вологості цього середовища. Швидкість випаровування зростає зі зменшенням вологості газу.

2. Метод точки роси полягає у визначенні температури, до якої необхідно охолодити ненасичений газ для того, щоб привести його в стан насичення. Якщо відома температура точки роси, то за допомогою таблиць насиченої водяної пари можна визначити абсолютну вологість газу.

3. Сорбційний метод ґрунтується на поглинанні вологи із контрольного середовища деякою речовиною. Кількість поглинутої вологи визначається за зміною маси або інших параметрів цією речовиною. В залежності від зміни властивостей речовини розрізняють наступні види сорбційного методу:

– сорбційно-електролітичний – вологість визначається за зміною електричної провідності плівки з нанесеним на неї сорбентом, у якості якого найчастіше використовується хлористий літій або фтористий барій у суміші з вивареною або сегнетовою сіллю;

– сорбційно-кулонометричний метод – вологість визначається за кількістю електрики, що витрачається на електроліз вологи, яка поглинута плівкою частково гідратованою пятиокисом фосфору;

– сорбційно-кулонометричний дифузійний – сорбент відділяється від контрольного середовища пористою перегородкою – дифузійним бар’єром, що пропускає тільки частину вологи, маса якої визначається електролізом;

– п’єзосорбційний метод – використовується залежність власної частоти коливань кварцового резонатора від маси вологопоглинаючої речовини, нанесеної на поверхню кварцової пластини;

– сорбційно-деформаційний метод – використовується залежність розмірів деяких вологосорбуючих матеріалів від вологості середовища; чутливим елементом служить капронова нитка, плівки різних матеріалів;

– сорбційно-масовий метод – ґрунтується на властивості деяких речовин поглинати вологу – силікагель, хлористий кальцій, хлористий літій, фосфорний ангідрид; абсолютна вологість визначається за збільшенням маси сорбенту та кількості пропущеного через сорбент газу;

– сорбційно-термічний метод – ґрунтується на вимірюванні кількості теплоти, що виділяється від сорбції вологи гігроскопічним матеріалом.

4. Конденсаційний метод ґрунтується на охолодженні контрольного газу до повної конденсації вологи, що міститься у ньому. Кількість вологи визначається за об’ємом скрапленої води.

5. Спектрометричний метод – ґрунтується на використанні залежності поглинання випромінювань від вологості досліджуваного газу. Застосовується інфрачервоне, ультрафіолетове або радіоактивне випромінювання.

6. Електрохімічний метод (метод К. Фішера) – ґрунтується на вимірюванні електричного потенціалу, що виникає в розчині Фішера з виділення металевого йоду, безводного піридину та сухого сірчаного ангідриду у метанолі від потрапляння в нього води: $J_2 + SO_2 + 2H_2O \Leftrightarrow 2J^- + SO_4^{2-} + 4H^+$.

7. Метод теплопровідності – ґрунтується на різниці теплопровідності сухого та зволоженого тіла.

14.3 Психрометричний метод вимірювання вологості газів

Психрометричний метод є одним з найпоширеніших методів вимірювання вологості для позитивних температур. Він оснований на пониженні температури вільної поверхні, змоченої рідиною, в результаті витрат тепла на випаровування рідини в зовнішню атмосферу. Основу методу складає залежність між парціальним тиском (пружністю) водяної пари та різницею показів сухого термометра t_c і термометра, поверхня якого змочується водою, $t_м$ (мокрий термометр). Ця залежність описується формулою:

$$P_п = P_{пн}^{м} - AP(t_c - t_м), \qquad (14.4)$$

де $P_{пн}^{м}$ – максимально можливий парціальний тиск водяної пари за температури $t_м$;

A – психрометричний коефіцієнт;

P – атмосферний тиск.

Отже, відносна вологість буде визначатись, як:

$$\varphi = \frac{P_{пн}^{м}}{P_{пн}^{c}} - \frac{AP}{P_{пн}^{c}}(t_c - t_м), \qquad (14.5)$$

де $P_{пн}^{c} = P_{пн}$ – максимально можливий парціальний тиск водяної пари за температури газу t_c.

За показами сухого і мокрого термометрів можна безпосередньо визначити відносну вологість φ, якщо відоме значення коефіцієнта A. З цією метою використовуються психрометричні таблиці, складені для деяких конструкцій психрометрів.

Психрометричний коефіцієнт залежить: від багатьох чинників, що впливають на тепло- і масообмін чутливого елементу мокрого термометра з оточуючим середовищем, розміру і форми чутливого елементу, виду та стану гноту, що підводить рідину і змочує його, теплопровідності його захисної оболонки та її захисту від випромінювання.

Серед зовнішніх чинників, що визначають роботу психрометра, найбільше значення має швидкість руху повітря біля мокрого термометра. З ростом швидкості повітряного потоку посилюється випаровування та зменшується спотворення впливів притоку тепла (променевого і від теплопровідності).

Залежність коефіцієнта A від швидкості руху повітря v наведена на рисунку 14.1 (крива 1); на цьому ж рисунку подана залежність показів електричного психрометра від швидкості руху повітря біля мокрого термометра за відносної вологості φ = 29,5% (крива 2). Коефіцієнт A швидко спадає з ростом швидкості повітряного потоку і при швидкості v >2,5 м/с наближається до постійної величини. Для вказаних швидкостей покази психрометра практично не залежать від зміни швидкості руху повітря. На основі цього, у давачах більшості сучасних психрометрів передбачені пристрої для аспірації повітря з постійною швидкістю не нижче 3-4 м/с, що дає можливість стабілізувати покази психрометра.

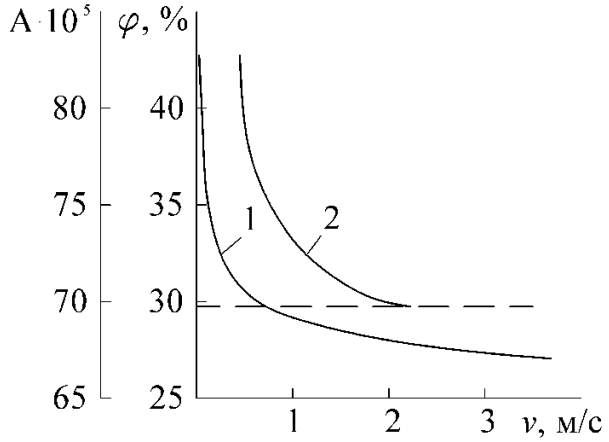


Рисунок 14.1 – Залежність від швидкості руху повітря: 1 – психрометричного коефіцієнта A; 2 – показів електричного психрометра

14.4 Випаровувальні аналізатори

Одним з найпоширеніших газоаналізаторів (вологомірів) є психрометр. Дія його основана на вимірюванні температури рідини під час її випаровування в контрольний газ. Психрометри можуть використовуватись для вимірювання концентрації парів будь-яких рідин в газах, але найчастіше використовуються як гігрометри – для визначення концентрації парів води.

Автоматичний психрометр, призначений для вимірювання відносної вологості повітря показано на рисунку 14.2.

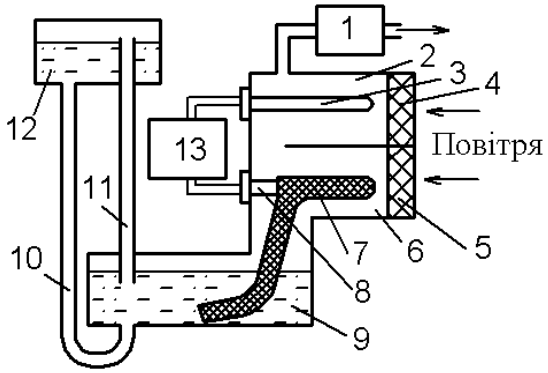


Рисунок 14.2 – Схема випаровувального аналізатора

Повітря з допомогою вентилятора 1 із швидкістю 3-4 м/с прокачується через фільтри 4 і 5 до камер 2 і 6, у яких розміщені платинові терморезистори 3 і 8. Терморезистор 3 служить для вимірювання температури повітря, його називають сухим термометром. Термометр 8 обгорнутий бавовняною тканиною 7 (ґнотом), кінець якого занурений у ванночку 9, заповнену дистильованою водою. Цей термометр називають мокрим термометром. Під час випаровування води з поверхні ґноту в потоці повітря температура терморезистора 8 зменшується, і тим більше, чим менша його вологість. Опори терморезисторів 3 і 8 вимірюються спеціальним вторинним приладом 13.

Для підтримання у ванночці певного рівня води служить бачок 12 з трубками 10 і 11. По мірі випаровування води з гноту її рівень у ванночці 9 понижується, відкривається нижній кінець трубки 11, через нього в бачок поступає повітря і із бачка у ванночку 9 стікає вода. Коли вода перекриває нижній отвір трубки 11, в газовому просторі бачка поступово утворюється розрідження. Вода із бачка витікає до того часу, доки це розрідження стане достатнім для врівноваження гідростатичного тиску, що визначається різницею рівнів води в бачку та ванночці.

Визначення відносної вологості за температурами сухого t_c та мокрого $t_м$ термометрів базується на наближеній залежності:

$$\varphi = f\left(\frac{t_м - a}{t_c - b}\right). \qquad (14.6)$$

Обчислення відносної вологості за приведеним виразом здійснюється вторинним приладом 13.

Вимірювальна частина приладу (рис. 14.3) складається з двох вимірювальних мостів I і II. Обидва мости живляться змінним струмом від одного джерела живлення і мають два загальних плеча *R1* та *R3*. Сухий термометр опору R_{TC} включений в плече моста I, мокрий – R_{TM} в плече моста II.

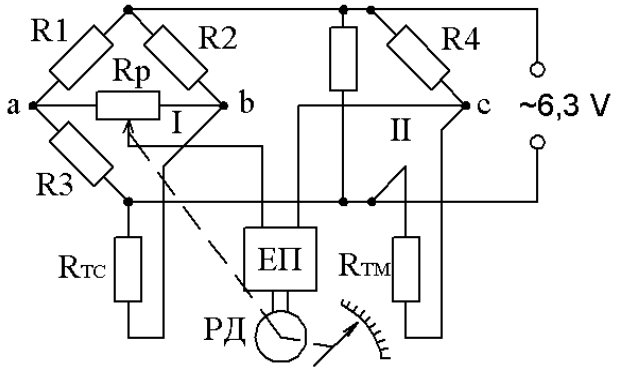


Рисунок 14.3 – Вимірювальна схема вторинного приладу

Міст I утворений постійними резисторами *R1*, *R2*, *R3*, R_{TC}, а міст II – резисторами *R1*, *R3*, *R4*, R_{TM}. Різниця потенціалів в точках *a* і *b* діагоналі моста I пропорційна температурі сухого термометра опору, а різниця потенціалів у точках

a і *c* – температурі мокрого термометра опору.

Спад напруги між точками *b* і *c* діагоналі подвійного моста пропорційний різниці температур сухого та мокрого термометрів опору. Рівновага вимірювальної схеми встановлюється автоматично зміною положення движка реохорда R_p, який приводиться в рух від реверсивного двигуна *РД*. Одночасно зміщується стрілка відлікового пристрою.

Шкала приладу градуйована в одиницях відносної вологості (%). Якщо прилад працює за низьких температур, то для змочування мокрого термометра використовується 3% водяний розчин формальдегіду.

Діапазон вимірювання психрометра 20-100% відносної вологості, класи точності 4-6; час реакції 3-5 хв.

14.5 Конденсаційні аналізатори

Конденсаційні аналізатори використовується, в основному, в якості гігрометрів, тобто приладів для визначення кількості водяних парів у повітряній атмосфері. Схема конденсаційного гігрометра, яка приведена на рисунку 14.4.

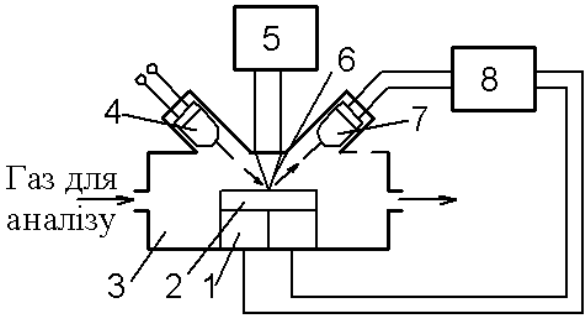


Рисунок 14.4 – Схема конденсаційного аналізатора

В основу роботи покладено вимірювання температури, за якої контрольний газ за незмінного тиску досягає стану насичення. Із нього випадає конденсат (роса) рідини, концентрація парів якої в газі вимірюється. Цю температура називається температурою точки роси (або інію), а прилади, для вимірювання цієї температури – гігрометрами точки роси.

Газ для аналізу з постійними об’ємними витратами прокачується через камеру 3, в якій розміщено напівпровідниковий термоелемент (термопара) 1, що служить холодильником. У термопарі 1 використано принцип Пельт’є. Цей принцип полягає у підвищенні температури одного спаю та пониженні температури другого спаю від проходження струму у термоелектричному колі.

До холодного спаю цієї термопари припаяно металеве дзеркальце 2. До гарячого спаю термопари подається напруга постійного струму від автоматичного регулятора 8. Внаслідок протікання через термопару постійного струму її холодний спай, а з ним і дзеркальце 2, охолоджуються. Охолодження відбувається до того часу, доки на поверхні дзеркальця не утвориться конденсат (іній). Світловий потік, що поступає від лампи 4 до фотоприймача 7 зменшується за рахунок розсіювання на поверхні дзеркальця, покритого конденсатом. Це

викликає зменшення вихідного сигналу регулятора та відключення або зменшення, у залежності від прийнятого закону регулювання, напруги живлення термопари 1 за рахунок теплоти, яка вноситься потоком контрольного газу в камеру 3, дзеркальце і холодний спай поступово нагріваються. Конденсат випаровується і світловий потік відновлюється до початкового стану. Регулятор 8 підключає або збільшує напругу живлення термопари і холодний спай знову починає охолоджуватись. Таким чином, температура дзеркальця автоматично підтримується рівною температурі точки роси. Ця температура перетворюється в уніфікований сигнал з допомогою термоелектричного чутливого елементу 6 та нормуючого перетворювача 5.

Існують вологоміри, у яких дещо змінений принцип дії. У цих вологомірах температура дзеркала підтримується постійною, а конденсат випадає на поверхню дзеркала від зміни тиску газу.

Гігрометри точки роси мають діапазон вимірювання від –80 до +40°С для тиску контрольного газу 0,05-10 МПа. Абсолютна похибка вимірювання складає ±0,5°С.

14.6 Вимірювання вологості твердих тіл і сипких речовин

Вологість твердих тіл і сипких матеріалів характеризується або вмістом вологи:

$$d = \frac{M}{M_0}, \tag{14.7}$$

або вологістю

$$W = \frac{M}{M_1} = \frac{M}{M_0 + M}, \tag{14.8}$$

де M – маса вологи, що міститься у тілі;

M_0 – маса абсолютно сухого тіла;

M_1 – маса вологого матеріалу.

Іноді як вміст вологи d, так і вологість W виражають у відсотках. Для вимірювання вологості сипких речовин і твердих тіл (шкіри, паперу, дерева тощо) використовують, головним чином, електричні методи. У деяких випадках використовується метод гігрометричної рівноваги, що полягає у вимірюванні за допомогою електричних гігрометричних давачів вологості повітря, яке знаходиться у гігрометричній рівновазі з вологим твердим матеріалом. У цьому випадку відпадає необхідність у безпосередньому вимірюванні параметрів твердого матеріалу.

У електричних методах вимірювання використовується залежність різних електричних властивостей тіла від вологості. Розрізняють наступні електричні методи: кондуктометричний, діелектричних втрат, ємнісний.

Кондуктометричний метод ґрунтується на залежності питомої об’ємної провідності, що вимірюється на постійному струмі, від вмісту вологи. На

рисунку 14.5 наведена характерна залежність логарифму активного опору комірки, заповненої дослідним матеріалом, від його вологості.

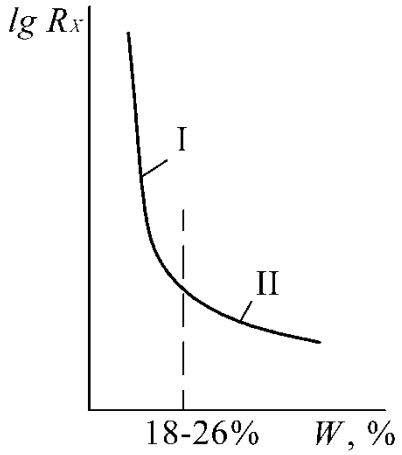


Рисунок 14.5 – Залежність опору давача кондуктометричного вологоміра від вологості матеріалу

На графіку різко проявляються дві області – перша I, де матеріал наділений малою і середньою вологістю. Для цієї області характерна висока чутливість методу (велика крутизна кривої). До вологості 18-26% наближено можна прийняти:

$$\lg R_X = a - bW, \qquad (14.9)$$

де a і b – коефіцієнти, що залежать від матеріалу і умов вимірювання.

У другій області II – області з підвищеною вологою – чутливість невисока. Провідність вологого матеріалу, що вимірюється на постійному струмі, залежить від його в'язкості, концентрації електроліту, характеру структури і температури матеріалу. Позаяк за невеликої вологості опір комірки R_X, заповненої матеріалом, дуже великий ($R_X > 10^{12}$ Ом), то вимірювання його з великою точністю ускладнюється. Для вимірювання необхідно створювати однакові умови підготовки і введення зразка у міжелектродний простір, використовуючи або давачі зі спеціальним ущільнюючим пристроєм, або такі здавачі, у яких ущільнення забезпечується самим об'єктом, наприклад, рухомий транспортер. Очевидно, що здавачі другого типу простіші, а тому їх застосовують у автоматичних системах регулювання вологості.

Неавтоматичні кондуктометричні вологоміри виконані переважно у вигляді омметрів і мегомметрів, а автоматичні – у вигляді мостових електронних схем. Кондуктометричний метод дає можливість визначати вологість твердих і сипких матеріалів тільки наближено. Похибка вимірювання приблизно складає 6 – 8% і більше.

Ємнісний метод ґрунтується на лінійній залежності діелектричної проникності речовини ε від його вологості. Відомо, що діелектрична проникність для сухих речовин $\varepsilon \approx 2{,}0\text{-}5{,}0$, а для води $\varepsilon = 81{,}0$. Тому невелика зміна вологості

призводить до значної зміни ε. Діелектрична проникність вологої речовини вимірюється через ємність конденсаторного давача. Для плоского конденсаторного давача, ємність [пФ]:

$$C = 0{,}08842\varepsilon\frac{S}{d}, \tag{14.10}$$

а для циліндричного:

$$C = \frac{0{,}2416\varepsilon}{\lg\frac{d_2}{d_1}}, \tag{14.11}$$

де d – віддаль між обкладинками конденсатора, см;

d_1 – діаметр внутрішнього електрода, см;

d_2 – внутрішній діаметр зовнішнього електрода, см;

S – площа обкладинок конденсатора.

У вимірювальній схемі (рис. 14.6) ємність конденсаторного давача визначається за допомогою паралельного резонансного контуру з індуктивністю L і ємністю C_0. Контур розмежований від генератора індуктивністю і ємністю. Індикатором резонансу служить електронний мілівольтметр РА.

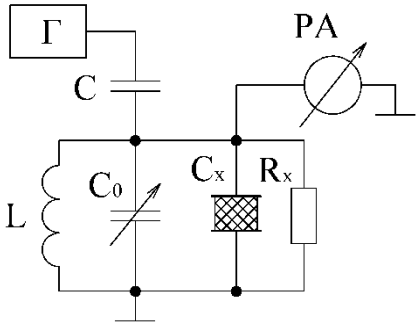


Рисунок 14.6 – Схема ємнісного індикатора вологості

Діелектричні втрати давача можна виразити опір R_x, що шунтує вимірювану ємність C_x.

Позитивною особливість такої схеми є те, що резонансна ємність теоретично не залежить від величини опору, який шунтує конденсатор. В момент резонансу досягається максимум напруги. Величина еквівалентної ємності контуру:

$$C_{рез} = \frac{L}{R^2 + \omega^2 L^2}, \tag{14.12}$$

де L – індуктивність котушки, ввімкненої в контур;

R – активний опір індуктивної котушки;

ω – колова частота.

Величина опору R_x тільки змінює амплітуду максимальної напруги, але не

змінює величину $C_{рез}$.

Резонансні схеми використовуються в основному як індикатори зміни ємності. Для створення приладів з неперервними показами необхідно суттєво ускладнити схему, бо вимагається автоматичне підналагодження ємності C_0. У такому випадку доцільніше використовувати мостові схеми.

Контрольні питання

1. Що таке абсолютна та відносна вологість газів?
2. На яких фізичних явищах ґрунтуються основні методи визначення вологості газів та твердих тіл?
3. Чому у психрометрах використовуються два термометри?
4. Що собою являє вимірювальна схема автоматичного психрометра?
5. Як за точкою роси визначається відносна вологість газу?
6. Як поділяються прилади, що використовуються для аналізу вологості газів сорбційним методом?
7. Які методи використовуються для вимірювання вологості твердих тіл і сипких матеріалів?
8. Що служить вимірювальним перетворювачем у схемі для визначення вологості резонансним методом?

ТЕМА 15
АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ

План

15.1 Автоматизовані системи контролю та управління.

15.2 Застосування комп'ютеризованих вимірювальних засобів у технологічних процесах та енергетичних системах.

15.3 Класифікація методів та засобів автоматичного контролю якості продукції.

15.4 Структурні схеми автоматичних аналізаторів.

15.5 Способи підключення аналізаторів до технологічних потоків.

15.1 Автоматизовані системи контролю та управління

Автоматизація – один з напрямів науково-технічного прогресу, спрямований на застосування саморегульованих технічних засобів, економіко-математичних методів і систем керування, що звільняють людину від участі в процесах отримання, перетворення, передачі і використання енергії, матеріалів чи інформації, істотно зменшують частку цієї участі чи трудомісткість виконуваних операцій. Разом з терміном автоматичний, використовується поняття автоматизований, що підкреслює відносно великий ступінь участі людини в процесі.

Автоматизація, окрім об'єкта керування вимагає додаткового застосування давачів (сенсорів), керуючих пристроїв (контролерів із засобами вводу-виводу), виконавчих механізмів та, у переважній більшості, базується на основі використання електронної техніки та методів обчислень, що іноді копіюють нервові і розумові функції людини.

В основі комплексного контролю і автоматизації процесів лежить використання інформаційно-вимірювальних систем.

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) згідно означення – це сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших допоміжних технічних засобів для отримання вимірювальної інформації, її перетворення, оброблення з метою подачі споживачу у необхідному вигляді, або автоматичного здійснення логічних функцій контролю, діагностики, ідентифікації.

Інформація, яка характеризує об'єкт вимірювання, сприймається ІВС, обробляє за деяким алгоритмом, в результаті чого на виході системи отримується кількісна інформація, що відображає стан даного об'єкта. Вимірювальні інформаційні системи суттєво відрізняються від інших типів інформаційних систем та систем автоматичного управління.

За характером взаємодії системи з об'єктом дослідження і обміну інформацією між ними ІВС можуть бути розділені на активні і пасивні. Пасивні системи тільки сприймають інформацію від об'єкта, а активні, діючи на об'єкт через пристрій зовнішнього впливу, дозволяють за короткий час автоматично і

якнайповніше визначити його динаміку.

Для вимірювальних систем характерні:

– більш високі у відношенні до систем іншого виду вимоги щодо метрологічних характеристик;

– більш широкий спектр вимірюваних фізичних величин і особливо, їх кількості;

– необхідність у засобах подачі інформації, що пов'язано з тим, що основний масив інформації з виходу систем передається людині для прийняття їм рішення про зміну умов проведення експерименту, його продовження або припинення;

– більший об'єм зовнішньої пам'яті для систем, у яких оброблення та аналіз результатів вимірювання виконується після завершення процесу експерименту за допомогою набору різних засобів оброблення та подачі інформації.

15.2 Застосування комп'ютеризованих вимірювальних засобів у технологічних процесах та енергетичних системах

Кожному конкретного виду ІВС властиві численні особливості, обумовлені вузьким призначенням систем та їх виконанням.

За характером взаємодії системи з об'єктом дослідження та обміну інформацією між ними ІВС можуть бути розділені на активні і пасивні. Пасивні системи тільки сприймають інформацію від об'єкта, а активні, діючи певним чином на об'єкт шляхом зовнішніх впливів, дозволяють автоматично і найбільш повно за короткий час вивчити його поведінку. Такі структури широко застосовуються для автоматизації вимірювань та наукових досліджень різних об'єктів.

Залежно від характеру обміну інформацією між об'єктами і активними ІВС розрізняють системи без зворотного зв'язку та зі зворотним зв'язком за впливом. Вплив на об'єкт може здійснюватися за заздалегідь встановленою жорсткою програмою або за адаптивною програмою, яка враховує реакцію об'єкта. У першому випадку реакція об'єкта не впливає на характер вимірювальної дії, а отже, і на хід експерименту. Його результати можуть бути видані оператору після закінчення. У другому випадку результати реакції відображаються на характері вимірювальної дії, тому обробка інформації ведеться в реальному часі.

Такі системи повинні мати розвинену швидкодіючу обчислювальну мережу. Крім того, необхідне постійне подання інформації операторові у формі, зручній для сприйняття, з тим, щоб він міг втручатися в хід процесу.

Створення та експлуатація сучасних технологічних процесів вимагають організації великої кількості вимірювань та контролю. Наприклад, контроль за станом систем та апаратів АЕС виконується з використанням до 3000 первинних вимірювальних перетворювачів.

Вирішення таких задач традиційними засобами – підключення до кожного первинного вимірювального перетворювача індивідуального вимірювального пристрою є досить складною задачею, потребує великої кількості приладів, а оператор не в змозі слідкувати за їх показами.

Власне, сам процес вимірювання, контролю, використання інформативних даних для енергетичних систем і у технологічних процесах практично не відрізняється. Основна відмінність полягає в тому, що в енергетичних системах перевага надається збору достовірної інформації та її довготривале зберігання, а в системах автоматизації практично вся вимірювальна інформація використовується в реальному часі, а тому висуваються підвищені вимоги щодо швидкодії ІВС.

На практиці для вимірювання фізичних величин застосовуються електричні методи і, у багатьох випадках – неелектричні (наприклад, пневматичні, механічні, хімічні тощо). Фізичні величини можуть мати різну природу, наприклад, температура, об'ємні і масові витрати речовин, тиск, рівень речовини, час, швидкість переміщення, склад речовини (густина, вологість, вміст домішок тощо), напруга, сила струму.

Електричні методи вимірювання набули найбільш широкого поширення, так як з їх допомогою досить просто здійснювати перетворення, передачу, оброблення, зберігання, подання та введення вимірювальної інформації в ЕОМ. Робота комп'ютеризованої системи або комплексу взагалі можлива лише на основі використання електричних сигналів. Тому у випадку неелектричних вимірювань використовуються проміжні перетворювачі – "неелектричний параметр – нормований електричний сигнал".

15.3 Класифікація методів та засобів автоматичного контролю якості продукції

В основу автоматичного контролю якості продукції хіміко-технологічних процесів покладено хімічний аналіз, тому його часто називають автоматичним аналітичним контролем.

Хімічний аналіз – сукупність операцій, мета яких встановити, з яких речовин складається досліджуваний об'єкт (якісний аналіз), або у яких долях у нього входять ті або інші речовини (кількісний аналіз).

Розрізняють три групи методів аналізу: фізичні, фізико-хімічні та хімічні.

Фізичні основані на вимірюванні фізичних величин, властивих речовині, яка аналізується, наприклад, в'язкість, твердість тощо.

Фізико-хімічні методи аналізу основані на хімічних перетвореннях речовини, що аналізується та вимірюванні фізичних величин, що супроводжують ці перетворення, наприклад, температури або випромінювання в процесі окислення речовини.

Хімічні методи аналізу основані на хімічних перетвореннях та вимірюванні кількості продуктів цих перетворень.

У залежності від наявності попереднього впливу на речовину розрізняють: методи аналізу без перетворення речовини – безпосереднє вимірювання фізичних властивостей, і методи з попереднім перетворенням речовини – використовуються фізичні та хімічні методи перетворення речовини.

Фізичними називають перетворення, за яких вимірюються фізичні властивості речовини, а склад залишається незмінним, наприклад, агрегатного

стану речовини. Хімічними називаються перетворення, за яких змінюється стан речовини.

Вибірковими або селективними називають методи аналізу складу, що базуються на використанні фізичного явища або хімічної реакції, що вибірково (однозначно) залежить від концентрації в суміші певного компонента або групи компонентів одного класу.

Інтегральними (невибірковими) називають методи аналізу складу, що базуються на відмінностях у фізико-хімічних властивостях компонентів суміші.

Аналіз сировини й продукції здійснюється з допомогою засобів аналітичної техніки.

Аналізатор – вимірювальний прилад, установка або система, призначені для аналізу складу або властивостей речовини. Автоматичний аналізатор – у якому всі операції здійснюються автоматично.

Індикатор (визначник, сигналізатор) – аналізатор, що виробляє інформацію про якісний склад речовини, наприклад, про відсутність якогось певного компонента.

Аналізатор неперервної дії призначений для неперервного аналізу потоку речовини. Аналізатор циклічної дії – призначений для неперервного аналізу проб речовини, що змінюється в повному об’ємі з певною циклічністю.

15.4 Структурні схеми автоматичних аналізаторів

Автоматичні аналізатори – це складні вимірювальні системи, до складу яких, крім різноманітних вимірювальних засобів, входить ряд допоміжних пристроїв.

Спрощені схеми аналізаторів показані на рисунку 15.1. Класифікацію аналізаторів за принципом дії представлено у таблиці 15.1.

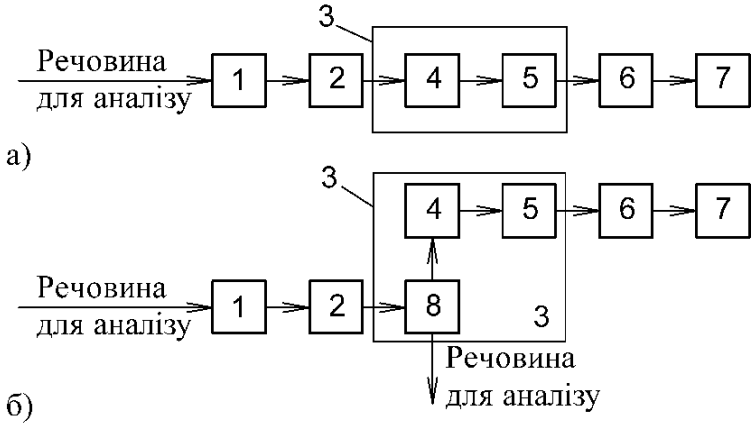


Рисунок 15.1 – Структурні схеми автоматичних аналізаторів:
а – неперервної дії; б – циклічної дії

Речовина для аналізу поступає у первинний вимірювальний перетворювач 3 через пристрій відбору 1 та підготовки 2. Первинні вимірювальні перетворювачі, або аналітичні пристрої аналізаторів неперервної (рис. 15.1, а) та циклічної дії (рис. 15.1, б) різні.

Таблиця 15.1 – Класифікація аналізаторів за принципом дії

Метод аналізу	Принцип дії
фізичний	механічний дифузійний акустичний тепловий аерозольний сорбційний магнітний радіоізотопний радіоспектрометричний рентгеноспектральний спектральний оптичний оптичний діелькометричний іонізаційний хроматографічний масс-спектрометричний
фізико-хімічний	електрохімічний термохімічний емісійний іонізаційний хемілюмінісцентний
хімічний	титрометричний об’ємний (волюметричний) манометричний

В аналізаторі неперервної дії аналітичний пристрій 3 складається з пристрою впливу на речовину 4 та чутливого елемента 5. Чутливий елемент 5 іноді називають детектором.

Аналізатори циклічної дії включають додатково дозуючий пристрій 8, вміщений до аналітичного пристрою 3. Дозатором із потоку речовини, яка поступає з пристрою 2, відбирається постійна за об’ємом або масою проба. Ця проба піддається відповідному впливу у пристрої 4, після чого чутливий елемент здійснює перетворення фізико-хімічної властивості проби або параметра, що супроводжує таку дію, у вихідний сигнал.

Практично у всіх випадках сигнали аналізаторів потребують спеціального оброблення, що виконується з допомогою різних обчислювальних та запам’ятовуючих пристроїв, які включаються між масштабуючим перетворювачем 6 та вимірювальним приладом 7.

Форми сигналів чутливих елементів автоматичних аналізаторів циклічної дії можуть бути різними залежно від використаного принципу дії. Найпростіші за формою є сигнали у вигляді кривої нормального розподілу (рис. 15.2, а) або трапеції (рис. 15.2, б).

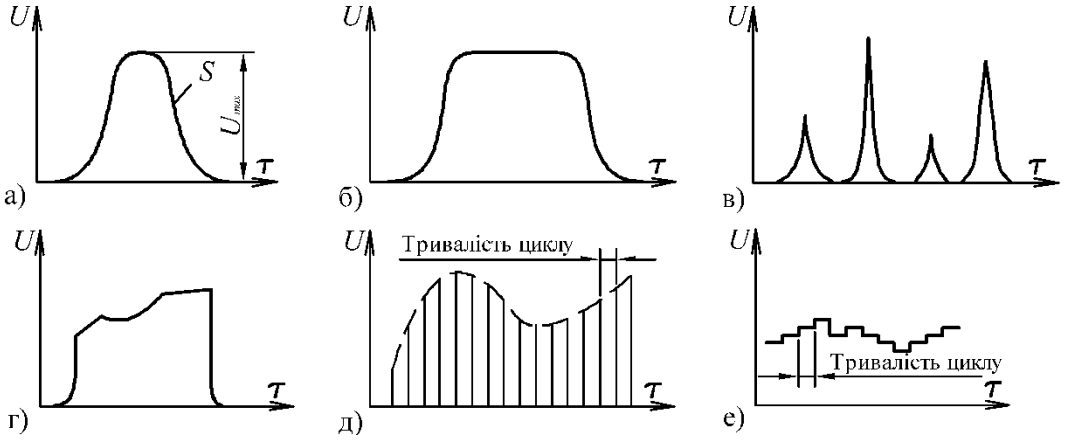


Рисунок 15.2 – Форми сигналів автоматичних аналізаторів

У першому випадку у якості інформативного параметра сигналу використовується амплітуда U_{max} або площа S сигналу, у другому – висота. Такі форми сигналів характерні для аналізаторів фізико-хімічних властивостей речовин і концентрації окремих компонент у бінарних та багатокомпонентних сумішах. Сигнал у вигляді спектру імпульсів, показаних на рисунку 15.2, (в) характерний для аналізаторів складу багатокомпонентних сумішей. Сигнали складної форми (рис. 15.2, г) характерні для аналізаторів показників якості.

Вихідний сигнал обчислювальних та цифрових пристроїв має форми, показані на рисунках 15.2, (д), (е). Результат вимірювання у кожному циклі подається у вигляді піка або штриха. Огинаюча амплітуд цих піків дозволяє отримати інформацію про зміну параметрів сигналу у часі.

15.5 Способи підключення аналізаторів до технологічних потоків

Підключення автоматичного аналізатора до технологічного потоку визначається рядом чинників, серед яких найбільш важливі: принцип дії аналізатора; конструкція пристрою відбору речовини; вимоги щодо швидкості аналізу; характеристики потоку речовини.

Найбільш зручним є безконтактний спосіб (рис. 15.3, а), за якого речовина не вводиться в аналізатор, а контроль ведеться через стінку технологічного апарату.

Другий, відносно простий метод (рис. 15.3, б) – чутливий елемент 3 аналізатора 2 поміщується безпосередньо у технологічний апарат або в потік речовини 1.

У більшості випадків використовуються способи, подані на рисунках 15.3, (в-е). Замкнутий спосіб підключення аналізатора (рис. 15.3, в, г) за якого аналізатор 2 встановлюється на байпасній лінії 4, реалізується або за рахунок наявності гідравлічного опору 5 між точками відбору, або за рахунок включення послідовно з аналізатором 2 в лінію 4 збуджувача потоку 6 (рис. 15.3, г).

На рисунку 15.3, (д) подано спосіб підключення аналізатора зі скидом речовини в атмосферу, каналізацію або спеціальну ємкість. Для зменшення

значень часу транспортного запізнювання довжина лінії 7, що з'єднує апарат або потік 1 з аналізатором, повинна бути мінімальною. Компромісним і найчастіше застосовуваним способом є підключення аналізатора у вигляді комбінації двох попередніх (рис. 15.3, е).

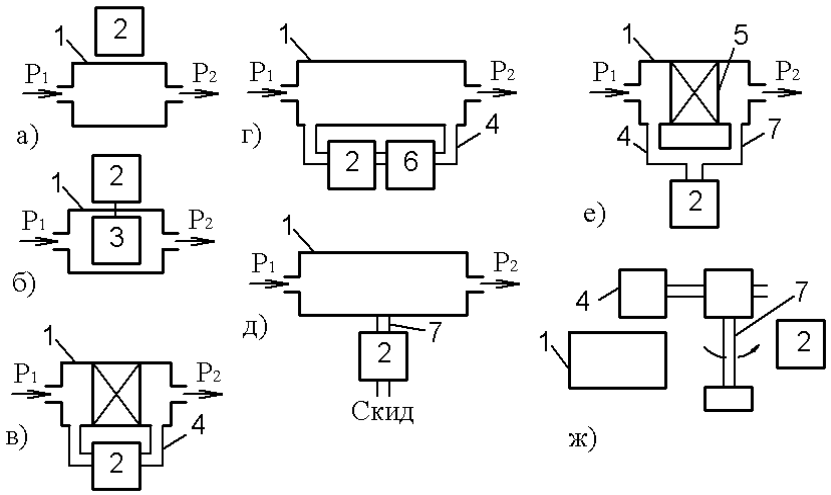


Рисунок 15.3 – Схеми підключення аналізаторів до технологічних потоків

Для відбору проб іноді використовують роботи. Робот 8 (рис. 15.3, ж) за допомогою спеціального захватного пристрою 9 забезпечує доставку проби речовини із технологічного потоку 1 в автоматичний аналізатор 2.

Для впорядкування застосування аналітичних вимірювальних засобів був створений комплекс аналітичної техніки АСАТ. АСАТ складається з підкомплексів засобів вимірювання хімічного складу, побудованих за принципом вимірювання. Для аналізу рідин визначені наступні підкомплекси: фотометричний, кондуктометричний, потенціометричний, полярографічний, хроматографічний, акустичний, діелектричний, а для газів – хроматографічний, рентгенівський, акустичний, діелектричний, тепловий, магнітний.

Контрольні питання

1. У чому полягає суть автоматизації процесів?
2. Які проблеми дозволяє вирішити автоматизація вимірювань?
3. Яким чином параметри фізичних неелектричних величин адаптуються в комп'ютеризованих вимірювальних системах та комплексах?
4. Як поділяються методи аналізу речовин?
5. Які аналізатори називаються індикаторами?
6. У чому полягає суть автоматизації вимірювань?
7. Чим відрізняються аналізатори неперервної та циклічної дії?
8. Від чого залежить форма сигналу на виході чутливого елементу?
9. Чим визначається схема підключення аналізатора до потоку?

ЛІТЕРАТУРА

1. Защепкіна Н. М. Метрологія: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.

2. Захарченко О. С. Основи метрології: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 127 с.

3. Солтис І. В., Деревянчук О. В. Основи метрології: навч. посіб. Чернівці: Чернівецький нац. ун-тет, 2021, 152 с.

4. Защепкіна Н. М., Шульга О. В., Наконечний О. А. Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 176 с.

5. Кухарчук В. В. Основи метрології та електричних вимірювань. Частина І: конспект лекцій. URL: https://surl.li/olaaof (дата звернення: 07.09.2025).

6. Нестерчук Д. М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: конспект лекцій. URL: https://surl.li/agtkcm (дата звернення: 08.09.2025).

7. Тичков В. В., Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В., Базіло К. В. Автоматизація виробничих процесів. Технічні засоби автоматизації: навч.-метод. посіб. URL: https://surl.li/bjsjat (дата звернення: 08.09.2025).

8. Коренець Ю. М. Стандартизація, сертифікація і метрологія: навч. посібник. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2023. 90 с.

9. Денисюк В.Ю., Пташенчук В.В. Розроблення блоку цифрової індикації електроакустичного твердоміра. *«Перспективні технології та прилади»*: зб. статей. 2023. Вип. 22. С. 122-126.

10. Пташенчук В.В., Денисюк В.Ю., Симонюк В.П. Вимірювання теплових деформацій торцешліфувальних автоматів та їх вплив на операційну точність оброблення підшипникової сталі ШХ15. *«Перспективні технології та прилади»*: зб. статей. 2022. Вип. 21. С. 102-106.

11. Денисюк В. Ю. Динамічні похибки в системах активного контролю та їх визначення в умовах експлуатації. *«Інформаційно-вимірювальні технології ІВТ-2022»*: зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 9-10 листопада 2022 р. Львів, 2022. С. 53-55.

12. Денисюк В. Ю. Аналіз особливостей конструювання та метрологічного забезпечення приладів активного контролю. *Перспективні технології та прилади»*: зб. статей. Луцьк, 2024. Вип. 24. С. 32-37.

13. Денисюк В. Ю., Лапченко Ю. С. Методика повірки покращення метрологічних характеристик акустичних датчиків рівня. Технологічні комплекси: наук. журнал. Луцьк, 2025. Вип. 17(1). С. 4-17.

14. Ptachenchuk, V., Denysiuk, V., Lapchenko, Y., Symoniuk, V., Reshetylo, O. Automated Control System Qualities of Roller Bearings in Butt End Grinding Operations. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing* VIII. DSMIE 2025. Lecture notes in mechanical engineering. Springer, Cham. 2025. pp. 219-228.

Метрологія, технологічні вимірювання та прилади : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Системи керування безпілотними апаратами», галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво (17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації) спеціальності G7(174) Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка денної та заочної форм навчання / уклад. В. Ю. Денисюк. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 252 с.

Комп'ютерний набір та верстка: В. Ю. Денисюк.

Редактор: в авторській редакції.

Підп. до друку «__» _____ 2025 р.
Формат 60х84/16. Папір офс. Гарн. Таймс.
Ум. друк. арк. 15,75. Обл. – вид. арк. 15,75.
Тираж _50_ прим. Зам. _____.

Відділ іміджу та промоцій
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75