

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та
водного господарства
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-
інтегрованих технологій

04-03-427М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни
«Технологічні вимірювання» для здобувачів вищої освіти
першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною
програмою «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка» спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з якості
ННІЕАВГ
Протокол № 6 від 28.01.2025 р.

Рівне – 2025

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Технологічні вимірювання» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форм навчання. [Електронне видання] / Матус С. К. – Рівне : НУВГП, 2025. – 32 с.

Укладач: Матус С. К., к.т.н., доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Відповідальний за випуск: Древецький В. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Керівник освітньої програми «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»: Христюк А. О., к.т.н., доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

© С. К. Матус, 2025
© НУВГП, 2025

Зміст

Практична робота № 1.	4
Практична робота № 2.	8
Практична робота № 3.	15
Практична робота № 4.	20
Практична робота № 5.	26
Практична робота № 6.	29
Література	32

Практична робота №1. Дискретне вимірювання неперервних величин. Визначення роздільної здатності АЦП

1.1 Мета роботи

Навчитися визначати роздільну здатність АЦП для досягнення заданої точності вимірювання

1.2 Теоретичні відомості

У процесі перетворення неперервного сигналу у послідовність цифрових даних в аналого-цифровому перетворювачі (АЦП) відбувається подвійне квантування. Неперервний сигнал вимірювальної інформації квантується за часом та за рівнем.

Квантування за часом відбувається через те, що вимірювання відбувається лише в дискретні моменти часу (рис. 1.1, а). В цифрових системах інтервал часу T , через який знімаються показники сигналу, – величина постійна, яку називають по-різному: циклом опитування, тактом квантування, періодом дискретизації.

При квантуванні сигналу за рівнем фіксуються певні дискретні значення рівнів сигналу (квантів) в моменти досягнення сигналом відповідного рівня (рис. 1.1, б).

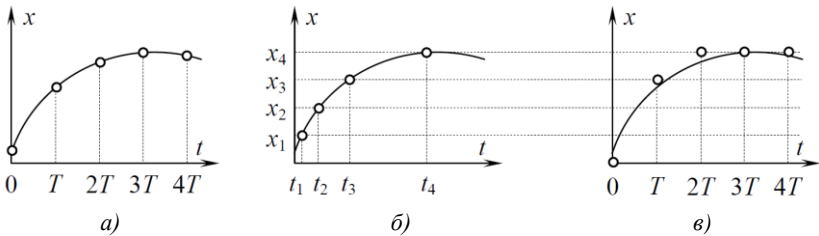


Рис. 1.1 Види квантування неперервного сигналу

При квантуванні сигналу за часом і рівнем неперервний сигнал замінюється дискретними рівнями, найближчими до значень неперервного сигналу у дискретні моменти часу (рис.1.1, в).

Необхідність квантування за рівнем пояснюється тим, що цифрове (числове) значення вимірюваної величини визначається

кількістю квантів, що містяться в сигналі при вимірюванні (рис. 1.1, в). Ціна поділу, або крок квантування за рівнем Δ визначається розрядністю АЦП, тобто числом розрядів для запису двійкових чисел.

Розглянемо перетворювачі із різною розрядністю з можливості представлення числа квантів, які містяться у вимірювальному сигналі.

При розрядності $r = 1$ можливо представлення двох рівнів сигналу – 0 або 1, тобто сигнал може бути представлений лише одним квантом.

При розрядності $r = 2$ можливе представлення двійковими числами чотирьох рівнів сигналу – 00, 01, 10, 11, тобто діапазон вимірюваного сигналу може бути розбитий на три кванти.

При $r = 3$ рівні квантування можуть бути представлені двійковими числами: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111, тобто діапазон вимірюваного сигналу може бути розбитий на сім квантів.

Таким чином, неважко помітити, що максимальна кількість квантів N_{max} , яку можна представити за допомогою r -розрядного АЦП, становить $N_{max} = 2^r - 1$, а крок квантування за рівнем

$$\Delta_{ке} = \frac{x_{max} - x_{min}}{N_{max}} = \frac{x_{max} - x_{min}}{2^r - 1} \approx \frac{x_{max} - x_{min}}{2^r}$$

або у відносних одиницях

$$\Delta_{ке}^{відн} \approx \frac{1}{2^r}; \quad \Delta_{ке}^{відн} (\%) \approx \frac{100}{2^r} (\%),$$

де x_{max} і x_{min} відповідно – верхня та нижня межі діапазону вимірювання.

В таблиці 1.1 наведено значення кроку квантування за рівнем, що відповідають АЦП з різною розрядністю r .

Таким чином, розрядність АЦП визначає його роздільну здатність. Визначення необхідної розрядності АЦП розглянемо на наступному прикладі.

Таблиця 1.1

Крок квантування залежно від розрядності АЦП

Число двійкових розрядів, r	8	12	16	24
Число квантів, N_{max}	255	4095	65535	16777215
$\Delta_{кв}^{відн}$	0,00392	0,00024	0,000015	0,0000000596
$\Delta_{кв}^{відн} (\%)$	0,392	0,024	0,0015	0,00000596

Приклад. Вимірюється температура в діапазоні $0 \dots 200$ °C із необхідною точністю до $0,1$ °C. Потрібно визначити необхідну розрядність АЦП.

Розв'язок. Необхідна відносна похибка вимірювання становить

$$\Delta_{відн} (\%) = \frac{0,1 \text{ } ^\circ\text{C}}{200 \text{ } ^\circ\text{C}} \cdot 100\% = 0,05\%$$

Відносна величина кроку квантування за рівнем в АЦП

$$\Delta_{кв}^{відн} (\%) = \frac{100}{2^r - 1} (\%)$$

З умови $\Delta_{кв}^{відн} (\%) \leq \Delta_{відн} (\%)$ знаходимо розрядність

$$\text{АЦП: } r \geq 11, \frac{100}{2^{11} - 1} = 0,049 < 0,05.$$

1.3 Завдання

Потрібно визначити розрядність АЦП, необхідну для досягнення заданої точності вимірювання.

Початкові дані наведені у табл. 1.2

Таблиця 1.2

Варіанти завдань

№ варіанта	Діапазон вимірювання, °C	Точність вимірювання
1	0...300	0,1
2	0...400	0,2
3	0...500	0,5
4	0...600	1,0
5	0...800	0,5

1.4 Контрольні запитання

1. Що таке розрядність АЦП?
2. Як впливає розрядність АЦП на точність вимірювання?
3. Скільки рівнів напруги може розрізнити трьохрозрядний АЦП?
4. Як називається час через який відбувається знімання сигналу?
5. Яку точність можна досягнути при вимірюванні десятирозрядним АЦП?

Практична робота №2. Структурні схеми та загальні функціональні елементи вимірювальних перетворювачів

2.1 Мета роботи

Набути теоретичних знань про структурні схеми та функціональні елементи засобів вимірювання

2.2 Теоретичні відомості

Засіб вимірювальної техніки є технічним засобом певної структури і його ступінь складності визначається характером та кількістю перетворень, необхідних, щоб перетворити інформативний параметр вхідного сигналу на інформативний параметр вихідного сигналу. Тому поняття структури доцільно пояснювати на прикладі засобу вимірювання, хоча кожен вимірювальний пристрій теж має певну структуру.

Всі проміжні перетворення здійснюються перетворювальними елементами й основані на певних фізичних ефектах, поєднання яких забезпечує роботу засобу вимірювань. Принципом дії засобу вимірювань називають фізичний принцип, що є основою його побудови.

Сукупність всіх відповідно з'єднаних перетворювальних елементів засобу вимірювань називають його вимірювальним колом. З огляду на чутливість важливою є роль першого перетворювального елемента у колі перетворення. Та його частина, на яку безпосередньо діє вимірювана чи перетворювана величина, називається чутливим елементом.

Вимірювальні кола засобів вимірювань зображають графічно схемами – структурними, функціональними і принциповими.

Структурною схемою вимірювального кола засобу вимірювань називається схема, що відображає його основні функціональні частини (структурні елементи), їхнє призначення та взаємозв'язки. Ступінь диференціації структурної схеми на структурні елементи залежать від призначення схеми.

Схему, яка, поряд зі структурою вимірювального кола, пояснює функціонування окремих його ділянок і процеси в них, називають функціональною, а схему, що відображає повний

склад елементів вимірювального кола, їх взаємозв'язки і дає уявлення про принцип дії засобу вимірювань – принциповою або повною його схемою.

Структурні елементи вимірювального кола з'єднують послідовно, паралельно, зустрічно-паралельно або змішано. Спосіб з'єднання елементів визначає метод вимірювального перетворення. Розрізняють методи прямого, зрівноважувального та комбінованого перетворень.

Пряме перетворення характерне тим, що вимірювальна інформація передається тільки в одному напрямі – від входу до виходу без зворотного зв'язку між ними (рис. 2.1).

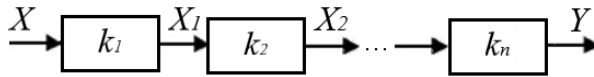


Рис. 2.1 Структурна схема засобу вимірювання

Коефіцієнт перетворення засобу вимірювань за такою структурною схемою за умови, що всі послідовно з'єднані перетворювальні елементи мають лінійні функції перетворення, дорівнюватиме добутку коефіцієнтів перетворення окремих перетворювачів

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n .$$

Сумарну похибку перетворення, спричинену неточністю всіх коефіцієнтів перетворення, можна визначити як:

$$\begin{aligned}
 dk &= \frac{\partial k}{\partial k_1} dk_1 + \frac{\partial k}{\partial k_2} dk_2 + \dots + \frac{\partial k}{\partial k_n} dk_n = \\
 &= (k_2 \cdot \dots \cdot k_n) dk_1 + (k_1 \cdot k_3 \cdot \dots \cdot k_n) dk_2 + \dots + (k_1 \cdot \dots \cdot k_{n-1}) dk_n ,
 \end{aligned}$$

або в скінченних приростах

$$\Delta k = (k_2 \cdot \dots \cdot k_n) \Delta k_1 + (k_1 \cdot k_3 \cdot \dots \cdot k_n) \Delta k_2 + \dots + (k_1 \cdot \dots \cdot k_{n-1}) \Delta k_n ,$$

а відносна похибка дорівнюватиме сумі відносних похибок, внесених окремими перетворювальними елементами

$$\delta = \frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta k_1}{k_1} + \frac{\Delta k_2}{k_2} + \dots + \frac{\Delta k_n}{k_n} = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n .$$

Зрівноважувальне перетворення полягає в тому, що вхідна

величина зрівноважується іншою однойменною величиною. Існує два види зрівноважувального перетворення: слідкуюче (від'ємний зворотний зв'язок між виходом та входом) зі статичною або астатичною характеристикою та розгортальне. Структуру засобу вимірювання статичного зрівноважувального перетворення показано на рис. 2.2.

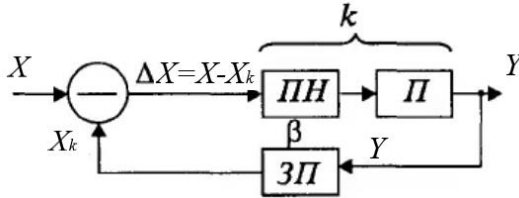


Рис. 2.2 Структурна схема засобу вимірювання

Під час статичного зрівноважувального перетворення вхідна величина X компенсується вхідною напругою $X_k = \beta Y$ ділянки зворотного перетворення, де Y – вихідна величина ділянки прямого перетворення, β – коефіцієнт перетворення зворотного перетворювача (ЗП). На вхід ділянки прямого перетворення, що складається з перетворювача недокомпенсації (ПН) та підсилювача (П) із загальним коефіцієнтом перетворення k , надходить різниця $\Delta X = X - X_k = X - \beta Y = X - k\beta\Delta X$. Отже, маємо:

$$\Delta X = \frac{X}{1 + k \cdot \beta}$$

Якщо коефіцієнт перетворення k великий при від'ємному зворотному зв'язку, то ΔX буде досить малою величиною і завжди пропорційна до значення вимірюваної величини X . У такому випадку коефіцієнт перетворення засобу статичного зрівноважувального перетворення рівний

$$K = \frac{Y}{X} = \frac{k\Delta X}{X_k + \Delta X} = \frac{k\Delta X}{k\beta\Delta X + \Delta X} = \frac{k}{1 + k\beta}$$

Похибку коефіцієнта перетворення K через неточність

коефіцієнтів перетворення k та β можна визначити як повний диференціал

$$dK = \frac{\partial K}{\partial k} dk + \frac{\partial K}{\partial \beta} d\beta = \frac{1}{(1+k\beta)^2} dk - \frac{k^2}{(1+k\beta)^2} d\beta,$$

а відносно похибку

$$\delta_K = \frac{dK}{K} = \frac{1}{1+k\beta} \delta_k - \frac{k\beta}{1+k\beta} \delta_\beta \approx -\delta_\beta$$

оскільки $k\beta \ll 1$.

Отже, буде нехтовно малою похибка, яку вносить ділянка прямого перетворення – мультиплікативна складова. А незмінна в часі систематична складова, що визначається сумою адитивних похибок ділянок і прямого, і зворотного перетворення, приводить до сталого зміщення нуля, однак її можна врахувати градуванням або корекцією нуля.

Структурна схема вимірювального кола засобу астатичного зрівноважувального перетворення відрізняється від попередньої схеми тим, що в ділянці прямого перетворення є інтегрувальний перетворювач, завдяки якому після закінчення зрівноваження $\Delta X = X - X_k = 0$, його вихідна величина Y досягає усталеного значення, а значення вимірюваної величини можна оцінити як $X = X_k$ (рис. 2.3).

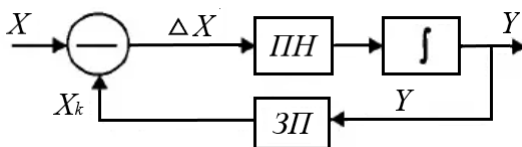


Рис. 2.3 Структурна схема засобу вимірювання

Важливою перевагою засобів зрівноважувального перетворення порівняно із засобами прямого перетворення є практично незначне споживання енергії від досліджуваного об'єкта. Тому таким засобом вимірювання можна вимірювати параметри малопотужного досліджуваного об'єкта, і не виникає додаткової похибки від споживання енергії об'єкта (методичної

похибки).

У випадку розгортального зрівноваження (рис. 2.4) величину, що компенсується генерує автономне джерело величини $ДКВ$, яка змінюється автоматично до моменту, коли $\Delta X = X - X_k$ стає настільки малою, що реагує пристрій порівняння K і подає сигнал на вихідний пристрій B про рівність $X = X_k$, а $ДКВ$ – інформацію про значення X_k .

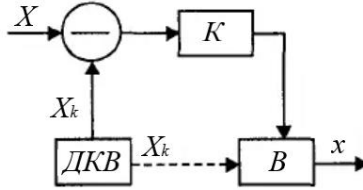


Рис. 2.4 Структурна схема засобу вимірювання

Комбіноване перетворення відбувається, коли від'ємним зворотним зв'язком охоплена тільки частина ділянки прямого перетворення.

Приклад. Вивчити принцип дії та скласти схему вимірювального перетворювача прямого перетворення.

Принципову схему п'єзоелектричного перетворювача прямого перетворення подано на рис. 2.5.

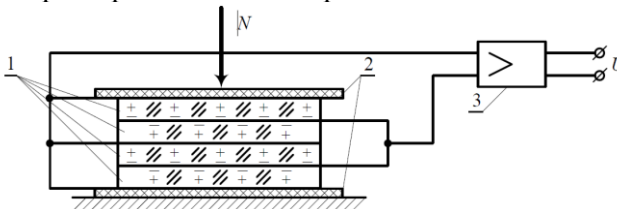


Рис. 2.5 Принципова схема п'єзоелектричного перетворювача
1 - пластинки кварцу; 2 – ізолятори; 3 – вихідний перетворювач-підсилювач

Принцип дії п'єзоелектричного перетворювача базується на явищі прямого п'єзоелектричного ефекту, що полягає в появі електричних зарядів на поверхні деяких кристалів під впливом механічних напружень, які виникають у них під дією прикладених зусиль.

Обернений ефект (якщо, наприклад, до кварцової пластини прикласти змінну напругу високої частоти, то вона здійснюватиме коливання відповідної частоти) називають явищем електрострикції.

Значення заряду Q пов'язане з прикладеною силою N співвідношенням:

$$Q = kN$$

де k – п'єзоелектрична стала, її значення не залежить від розмірів пластини і визначається природою кристала (для кварцу, наприклад $k = 2,1 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н).

Зовнішні грані стовпчика з кварцевих пластин 1 ізолюють від корпусу перетворювача ізоляторами 2, а внутрішні – самим кварцом із досить великим електричним опором. Завдяки металевим (фольговим) обкладинкам на поверхні кристалу, систему можна розглядати як конденсатор, заряд якого перетворюється в електричну напругу:

$$U = Q/C = kN/(C_0 + C_{II}),$$

де C_0 і C_{II} – ємності кварцу та провідників.

Функціональні елементи та структурна схема вимірювального перетворювача прямого перетворення. Виходячи з принципу дії заданого перетворювача знаходимо його функціональні елементи (табл. 2.1)

Таблиця 2.1

Функціональний склад вимірювального перетворювача

Номер	Функціональний елемент	Вхідний сигнал	Вихідний сигнал	Технічна реалізація
1	Первинний вимірювальний перетворювач	Зусилля N	Напруга U	П'єзоелектричний перетворювач
2	Проміжний перетворювач	Напруга U	Напруга U	Підсилювач

На основі табл. 2.1 складемо структурну схему

вимірювального перетворювача (рис. 2.6).

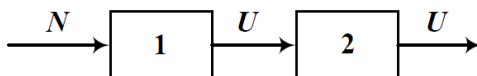


Рис. 2.6 Структурна схема вимірювального перетворювача
1- чутливий елемент; 2 – підсилювач

2.3 Завдання

Вивчити принцип дії та скласти схему перетворення вимірювального приладу (згідно завдання виданого викладачем).

2.4 Контрольні запитання

1. Якими схемами зображають графічно вимірювальні кола засобів вимірювань?
2. Що визначає метод вимірювального перетворення?
3. Які розрізняють методи перетворень?
4. Як передається вимірювальна інформація при прямому перетворенні?
5. Як змінюється вхідна величина при зрівноваженому перетворенні?

Практична робота №3. Визначення значень технологічних параметрів. Градування давачів

3.1 Мета роботи

Ознайомитися з порядком перетворення вимірюваного параметра в сигнали вимірювальної інформації та проведення градування давача

3.2 Теоретичні відомості

Інформацію про хід технологічного процесу в АСУТП переважно одержують шляхом вимірювання поточних значень технологічних параметрів та перетворення їх на сигнали вимірювальної інформації. Ці сигнали у вигляді постійної або змінної напруги, частоти, фази, часових інтервалів та кутів повороту можуть бути подані на ПК лише через аналого-цифрові перетворювачі (АЦП). Послідовність перетворення сигналу вимірювальної інформації в інформаційно-вимірювальному каналі представлена на рис. 3.1.

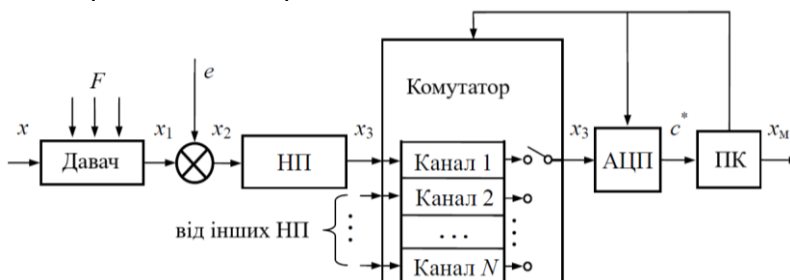


Рис. 3.1 Схема інформаційно-вимірювального каналу

Параметр x , що вимірюється, перетворюється за допомогою давача в сигнал вимірювальної інформації x_1 , який залежить у багатьох випадках від вектора параметрів впливу F .

На корисний сигнал вимірювальної інформації x_1 накладається завада e , до складу якої входить випадкова похибка давача, електричні наведення у з'єднувальних проводах, спричинені змінними магнітними полями від електричних установок, вплив пульсацій тисків та витрат у технологічних трубопроводах внаслідок роботи насосів та інші фактори.

Сумарний із завадою корисний сигнал x_2 надходить на вхід нормуючого перетворювача НП, де перетворюється на сигнал x_3 , приведений до входу АЦП. Комутатор не здійснює перетворення вхідного сигналу, а лише підключає по команді від ПК обраний вимірювальний канал до АЦП.

За командою від ПК АЦП перетворює неперервний сигнал x_3 в числову послідовність, здійснюючи квантування сигналу x_3 за часом і за рівнем. Код c^* на виході АЦП перераховується у значення вимірюваного параметра x_m і заноситься в пам'ять ПК.

Основним завданням цифрового контролю при первинній обробці інформації в АСУТП є виконання, з допустимою похибкою, умови $x_m = x$. Алгоритм виконання поставленого завдання:

- перерахунок коду, що надходить з АЦП у пам'ять ПК, у значення вимірюваного параметра;
- врахування параметрів які впливають на цифровий контроль (корекція результатів вимірювань);
- визначення періоду опитування давачів вимірюваних величин;
- фільтрація величин, що вимірюються, від завод;
- контроль та підвищення достовірності вихідної інформації;
- автоматичне виявлення подій.

Порядок перетворення вимірюваного параметра x у сигнали вимірювальної інформації представлений на схемі (рис. 3.1) інформаційно-вимірювального каналу.

На вхід ПК надходить код c^* з наступним перерахунком у значення вимірюваного параметра x_m . В ідеальному випадку має виконуватися умова $x_m = x$. Розглянемо послідовність такого перерахунку у припущенні, що відсутні завада e і вектор параметрів впливу F .

1. Перерахунок коду c^* в значення сигналу x_3 визначається виразом

$$x_3 = \frac{c^* (x_3^{max} - x_3^{min})}{c_{max}^*} + x_3^{min},$$

де x_3^{max} та x_3^{min} – відповідно верхня та нижня межі діапазону вихідного сигналу нормуючого перетворювача; $c_{max}^* = 2^r - 1$ – максимальне значення коду на виході АЦП (r – розрядність АЦП).

2. Перерахунок значення сигналу x_3 значення сигналу x_2 на вході нормуючого перетворювача.

При лінійній залежності сигналу x_3 від сигналу x_2 (в іншому випадку див. п. 3)

$$x_2 = \frac{x_3 - x_{30}}{k_{ny}} + x_{20}$$

де x_{30} – значення вихідного сигналу нормуючого перетворювача при вхідному сигналі x_2 ; k_{ny} – коефіцієнт передачі нормуючого перетворювача.

3. Перерахунок значення сигналу $x_2 = x_1$ у значення вимірюваного параметра x .

У загальному випадку вихідний сигнал давача x_1 пов'язаний із вимірюваним параметром, x нелінійною залежністю, і в багатьох випадках ця залежність відома у вигляді таблиці сукупності пар значень x_{1i} , x_i ($i = \overline{1, n}$).

Цю сукупність пар, як функціональну залежність, можна апроксимувати узагальненим поліномом виду (аналітичне градування давача)

$$x_m = \sum_{i=1}^m a_i \varphi_i(x_1),$$

де $\varphi_i(x_1)$ – задані функції. Коефіцієнти a_i вибираються відповідно до критерію близькості одержаних оцінок x_m до істинних значень x .

Часто сукупність пар значень x_{1i} , $x_i (i = \overline{1, n})$ апроксимують степеневим поліномом

$$x_m = a_m x_1^m + a_{m-1} x_1^{m-1} + \dots + a_1 x_1 + a_0.$$

Степінь полінома m вибирають таким чином, щоб помилка апроксимації не перевищувала допустимого значення. Якщо необхідна точність апроксимації не досягається, доцільно табличні значення розбити на групи і для кожної групи визначити відповідний апроксимуючий поліном.

Обчислення значень x_m за апроксимуючим поліномом зручно виконувати за схемою Горнера

$$x_m = \left(\left(\dots \left(a_m x_1 + a_{m-1} \right) x_1 + a_{m-2} \right) x_1 + \dots + a_1 \right) x_1 + a_0$$

За такого підходу в пам'яті ПК зберігаються значення лише коефіцієнтів полінома, а не вся сукупність пар значень x_{1i} , $x_i (i = \overline{1, n})$ градуовальної характеристики давача.

Приклад

- найменування параметра – температура;
- тип давача – термоелектричний перетворювач градуювання ТХК;
- діапазон вимірювання, °C – 0...600;
- діапазон зміни вихідного сигналу нормуючого перетворювача 0–10 В;
- коефіцієнт передачі нормуючого перетворювача, В/мВ – 0,204;
- розрядність АЦП $r = 12$;
- значення коду на виході АЦП – 2925;

Потрібно перерахувати значення коду c^* у значення вимірюваного параметра x .

1. Визначаємо значення сигналу x_3 на виході нормуючого перетворювача

$$x_3 = \frac{c^* (x_3^{\max} - x_3^{\min})}{c_{\max}^*} + x_3^{\min} = \frac{2925 \cdot (10 - 0)}{4095} + 0 = 7,14 \text{ В}$$

2. Визначаємо значення сигналу $x_2 = x_1$ на виході датчика

$$x_2 = \frac{x_3 - x_{30}}{k_{ny}} + x_{20} = \frac{7,14 - 0}{0,204} + 0 = 35 \text{ мВ} .$$

3. Визначаємо значення вимірюваного параметра x . За градууювальною характеристикою термоелектричного перетворювача градуювання ХК за допомогою методу найменших квадратів проведемо аналітичне градуювання датчика в діапазоні температур $0 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$ із відносною похибкою не більше 0,5%. Метод найменших квадратів дає

$$x_m = 3,01 + 13,75 \cdot x_1 - 0,03 \cdot x_1^2$$

де x_m – значення температури, $^\circ\text{C}$; x_1 – ЕРС термопар, мВ.

При $x_1 = 35 \text{ мВ}$ маємо $x_m = 447,5 \text{ }^\circ\text{C}$

3.3 Завдання

Потрібно перерахувати значення коду c^* у значення вимірюваного параметра x . Якщо:

- найменування параметра – температура;
- тип датчика – термоелектричний перетворювач градуювання ТХА;
- діапазон вимірювання, $^\circ\text{C}$ – $0 \dots 1200$;
- діапазон зміни вихідного сигналу нормуючого перетворювача $0-20 \text{ мВ}$;
- коефіцієнт передачі нормуючого перетворювача, $\text{мВ}/\text{мВ}$ – 0,4;
- розрядність АЦП r – 10;
- значення коду на виході АЦП – 492

3.4 Контрольні запитання

1. Як перерахувати код АЦП в одиниці вимірюваної величини?
2. Як реалізується розрахунок значення сигналу на виході нормуючого перетворювача?
3. Які завдання виникають при первинній обробці вимірювальної інформації в АСУТП?
4. Яка схема інформаційно-вимірювального каналу температури?
5. Яка схема інформаційно-вимірювального каналу рівня?

Практична робота №4. Вибір засобів для реалізації системи вимірювання тиску

4.1 Мета роботи

Навчитися підбирати технічні засоби для реалізації систем вимірювання тиску

4.2 Теоретичні відомості

Одним із найважливіших етапів автоматизації виробничих процесів є автоматичний контроль технологічних параметрів із метою ефективного керування перебігом технологічних процесів, тому велика увага приділяється вивченню основ теорії і техніки вимірювань технологічних параметрів та відповідних засобів вимірювальної техніки.

При виборі технічних засобів автоматизації визначається метод контролю кожного параметра технологічного процесу, на основі аналізу наведених відомих методів контролю, на предмет можливості його використання та обґрунтування вибору найкращого. Здійснюється вибір технічних засобів для реалізації системи автоматичного контролю технологічних параметрів. При виборі враховуються особливості технологічного процесу, умови пожежо- і вибухонебезпечності, агресивність, токсичність оточуючого середовища; параметри та фізико-хімічні властивості контрольованих середовищ; потрібно враховувати необхідну точність та швидкодію засобу. Систему автоматизації технологічного процесу реалізують на базі серійних технічних засобів із уніфікованими входними та вихідними сигналами. При цьому слід передбачити можливості сумісності обладнання для чого можуть використовуватися відповідні перетворювачі. При виборі датчиків необхідно звернути увагу на забезпечення необхідної точності вимірювань.

Вимірювальні перетворювачі тиску

Перетворювачі тиску використовуються в промисловості для безперервного вимірювання тиску середовища – рідини, газу (у тому числі кисню) або пари. Отримане значення перетворюється на вихідний сигнал – аналоговий чи цифровий.

Крім того, за наявності індикатора результат відображається на дисплеї.

Види тиску:

- *атмосферний (барометричний)* тиск створюється масою повітряного стовпа земної атмосфери;

- *абсолютний тиск* – тиск відносно вакууму. За початок відліку приймають тиск усередині посудини, з якої повністю відкачано повітря;

- *надлишковий тиск* є різницею між абсолютним і барометричним тисками;

- *розрідження (вакууметричний тиск)* – тиск в системі, який менший за атмосферний.

В Міжнародній системі одиниць (SI) за одиницю тиску прийнято *Паскаль* (Па) – тиск, що створюється силою в 1 ньютон (Н), яка рівномірно розподілена на площі в 1 м^2 і спрямована нормально до неї. Використовують позасистемні одиниці: бар, міліметр ртутного стовпа, міліметр водяного стовпа, кілограм-сила на квадратний сантиметр, кілограм-сила на квадратний метр ($1 \text{ атм (фізична)} = 1,033 \text{ ат (атмосфера технічна)}$), $\text{кг/см}^2 = 10,33 \text{ м вод. ст.} = 0,101325 \text{ МПа} = 101,325 \text{ кПа} = 14,696 \text{ psi (фунт/дюйм}^2) = 1,01325 \text{ бар} = 760 \text{ мм рт. ст.}$)

В залежності від вимірюваного і опорного тиску розрізняють наступні види перетворювачів тиску:

- перетворювач абсолютного тиску, вимірювання відбувається відносно вбудованої в прилад камери вакууму;

- перетворювач надлишкового тиску, вимірювання відбувається відносно зовнішнього атмосферного тиску;

- перетворювач вакууметричного тиску (розрідження в «мінус»), вимірювання відбувається відносно зовнішнього атмосферного тиску – зниження до абсолютного нуля;

- перетворювач надлишкового тиску та розрідження (плюс-мінус), вимірювання відбувається відносно зовнішнього атмосферного тиску;

- диференціальні перетворювачі перепаду (різниці) тисків (вимірюють різницю двох тисків: $\Delta P = P_1 - P_2$), перетворювачі перепаду можуть застосовуватися, як дифманометр-перепадомір,

рівнемір або витратомір, працюючи зокрема і під надлишковим робочим тиском.

За конструктивним виконанням чутливого елемента розрізняють такі види перетворювачів: тензометричні, п'єзометричні, ємнісні, резонансні, індуктивні, пневматичні та ін.

В ємнісних перетворювачах (рис. 4.1, а) тиск P сприймається металевою мембраною 3, що є рухливим електродом ємнісного елемента. Мембрана і нерухомі пластини 2 утворюють частину вимірювального ємнісного мосту. Електроди встановлено в корпусі 1, робочий простір перетворювача заповнено інертною робочою рідиною 5, яка передає тиск. Від вимірюваного середовища робочу рідину відділяють розділові мембрани 4. Ємнісні перетворювачі використовують для вимірювання тисків, що швидко змінюються.

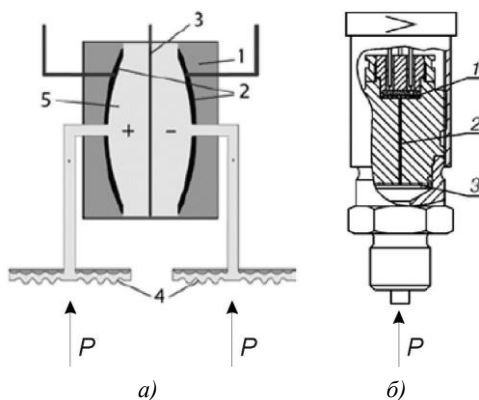


Рис. 4.1 Вимірювальні перетворювачі тиску

- а) ємнісний (1 – корпус перетворювача; 2 – нерухомі пластини конденсатора; 3 – мембрана, електрод; 4 – розділові мембрани; 5 – робоча рідина);
б) тензорезисторний (1 – вимірювальна мембрана з напіленими тензодавачами; 2 – робоча рідина; 3 – розділова мембрана)

Приклад. Перетворювач тиску вимірювальний *Rosemount 3051S* з ємнісним давачем, діапазон вимірювання тиску: 0–0,025 кПа; 0–68,9 МПа. Вихідні сигнали: 4–20 мА/HART, Foundation Fieldbus, реалізує функції самодіагностики. Розділові мембрани виконано з нержавіючої сталі 316L (X18H10T), сплав

C-276 (Хастелой), тантал. Можливе застосування виносних сенсорів. Вимірювані середовища: рідини, пара, газ, газові суміші.

В перетворювачах тензорезисторних (рис. 4.1, б) у якості чутливого елемента використовується кремнієва мембрана 1, на яку напилено напівпровідникові тензорезистори. Тиск P через розділову мембрану 3 передається робочій рідині, що заповнює канал 2, і далі на вимірювальну мембрану 1.

Деформація мембрани призводить до зміни опору напівпровідникових тензорезисторів. Тензодавачі включені в мостову вимірювальну схему. Вбудований мікропроцесор або аналогова схема перетворює зміну опору тензомосту в уніфікований струмовий (0–5, 0–20, 4–20 мА) або цифровий вихідний сигнал.

Вимірювальний перетворювач тиску *Rosemount 3051T*, тензорезисторний сенсор, діапазон вимірювання від 2,07 до 68950 кПа. Вихідні сигнали: 4–20 мА, HART. Сенсорний модуль містить вбудований термометр для корекції результатів вимірювання. Вимірювані середовища: газ; рідина (в т.ч. нафтопродукти), пара.

Застосування розділових мембран дозволяє уникнути контакту між вимірюваним середовищем і вимірювальною системою приладу. Вимірювальну частину приладу заповнюють інертною робочою рідиною (диметилсилоксан DC200, фторований вуглеводнем 3M Fluorinert FC77), яка передає зовнішній тиск. Застосовують вбудовані мембрани і виносні мембрани, які сполучені з приладом капілярними трубками. Розділові мембрани використовують, якщо:

- температура процесу виходить за межі робочого діапазону давача тиску;
- робоче середовище агресивне;
- робоче середовище містить завислі частинки або має підвищену в'язкість, що може викликати закупорення давача;
- робоче середовище може замерзати або тверднути усередині давача.

Приклад. Виносні розділові мембрани *Rosemount 1199*, тиск вимірюваного середовища до 68 МПа; температура

вимірюваного середовища від $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $415\text{ }^{\circ}\text{C}$; робоча рідина кремнійорганічна Silicone 704. Мембрана сполучена з вимірювальною частиною капіляром. Матеріал мембран – нержавіюча сталь 316L (X18H10T), тантал, титан.

При виборі *первинних вимірювальних перетворювачів* варто враховувати ряд факторів метрологічного та технологічного характеру, найбільш суттєвими з яких є наступні:

- допустима похибка вимірювальних пристроїв і вимірювальної системи в цілому;

- межа вимірювання первинного вимірювального перетворювача, в якому гарантована необхідна точність вимірювання;

- інерційність первинного вимірювального перетворювача, яка характеризується постійною часу;

- вплив на роботу первинного вимірювального перетворювача параметрів контрольованої та навколишнього середовищ (температури, тиску, вологості);

- руйнуючий вплив на первинний вимірювальний перетворювач контрольованого і навколишнього середовищ внаслідок абразивних властивостей, хімічного впливу та інших факторів;

- наявність у місці установки первинного вимірювального перетворювача неприпустимих для його функціонування магнітних і електричних полів, вібрацій та ін.;

- можливість застосування первинного вимірювального перетворювача з точки зору вимог пожежо- і вибухобезпеки;

- відстань, на яку має бути передана інформація, отримана за допомогою первинного вимірювального перетворювача;

- граничні значення вимірюваної величини та інших параметрів, що впливають на роботу первинного вимірювального перетворювача.

Розрізняють вимірювальні перетворювачі та прилади для вимірювання надлишкового тиску в межах від 0 до 100 МПа, напору – до 40 кПа, розріджень – до 40 кПа і вакууму – до 0,1 МПа, а також різниці (перепадів) тисків – до 16 МПа. Крім цих основних технічних характеристик, при виборі

вимірювальних перетворювачів тиску необхідно враховувати наступні фактори:

- характер зміни вимірюваного тиску в часі (тиск не змінюється, змінюється плавно, є пульсуючим);
- вплив середовища, тиск якого вимірюється, на матеріал чутливого елемента вимірювального перетворювача;
- граничний робочий тиск (для давачів перепаду тиску).

Межі вимірювань вимірювальних перетворювачів тиску вибирають із ряду значень, наведених в каталогах заводів-виробників засобів автоматизації і довідниках.

Вимірювальний перетворювач тиску повинен мати такий діапазон вимірювань, щоб вимірюваний тиск знаходився в межах $1/2...3/4$ цього діапазону, а пульсуючий тиск – в межах $1/3...2/3$ діапазону вимірювань.

Наприклад, для вимірювання розрідження, яке змінюється в межах $-35...-65$ кПа, при використанні вимірювального приладу з вхідним сигналом $0-5$ мА вибирають вимірювальний перетворювач тиску з вихідним сигналом $0-5$ мА, межі вимірювання якого, наприклад складають $-100...0$ кПа. В якості первинних вимірювальних перетворювачів тиску широко використовують перетворювачі із уніфікованим вихідним сигналом $0-5$ мА, $0-20$ мА, $4-20$ мА.

4.3 Завдання

Підібрати технічні засоби для реалізації системи вимірювання тиску, навести технічні характеристики, схеми підключення (згідно завдання виданого викладачем).

4.4 Контрольні запитання

1. Як здійснюється вибір первинних вимірювальних перетворювачів?
2. Як здійснюється вибір вимірювальних перетворювачів тиску?
3. На які види поділяються перетворювачі тиску в залежності від вимірюваного і опорного тиску?
4. Які одиниці вимірювання тиску?
5. На які види поділяються перетворювачі тиску за конструктивним виконанням чутливого елемента?

Практична робота №5. Вибір засобів для реалізації цифрової системи вимірювання рівня

5.1 Мета роботи

Навчитися підбирати технічні засоби для реалізації систем вимірювання рівня

5.2 Теоретичні відомості

В більшості технологічних процесах різних виробництв виникає необхідність у вимірюванні рівня рідин та сипких матеріалів, а також сигналізації мінімально чи максимально допустимих рівнів у резервуарах, апаратах. Сучасні прилади рівня поділяються на дві основні групи: рівнеміри (дають поточне значення рівня) та сигналізатори рівня (спрацьовують при пороговому значенні рівня). За принципом дії рівнеміри є: механічні, гідростатичні, кондуктометричні, ємнісні, радіоізотопні, акустичні, ультразвукові та ін.

За характером роботи розрізняють рівнеміри безперервної і періодичної дії. Рівнеміри періодичної дії (реле і давачі граничного рівня) спрацьовують при досягненні середовищем заданого рівня.

Визначення перевищення аварійного рівня рідин та сипучих продуктів за допомогою дискретних давачів забезпечує максимальну безпеку при роботі обладнання. Давачі контролю рівня є обов'язковими вузлами виробничих ємностей з рідинами та сипучими матеріалами.

Залежно від вихідного сигналу давача рівня можливі наступні варіанти підключення до мікропроцесорного вимірювального приладу:

1. Давач рівня з аналоговим вихідним сигналом. У такому випадку встановлюється аналогово-цифровий перетворювач, який перетворює аналоговий сигнал від давача у цифровий сигнал, який зчитується мікропроцесором (рис. 5.1).

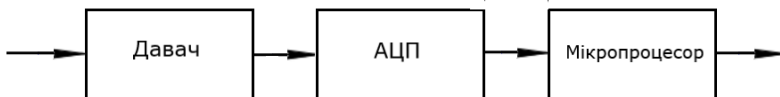


Рис. 5.1 Підключення давача рівня з аналоговим вихідним сигналом

2. Давач рівня з імпульсним вихідним сигналом. Імпульси з виходу давача часто можуть зчитуватися мікропроцесом напряму за допомогою вбудованих таймерів-лічильників. Якщо такої можливості немає, потрібно використовувати зовнішній лічильник імпульсів, який підключається цифровим інтерфейсом до мікропроцесора (рис. 5.2).

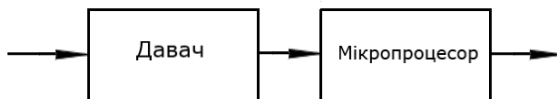


Рис. 5.2 Підключення давача рівня з імпульсним вихідним сигналом

3. Давач рівня з цифровим виходом. Такий давач може напряму підключатися до мікропроцесора через цифровий інтерфейс. Часто для узгодження логічних рівнів інтерфейсу давача і мікропроцесора використовується перетворювач інтерфейсів (рис. 5.3).

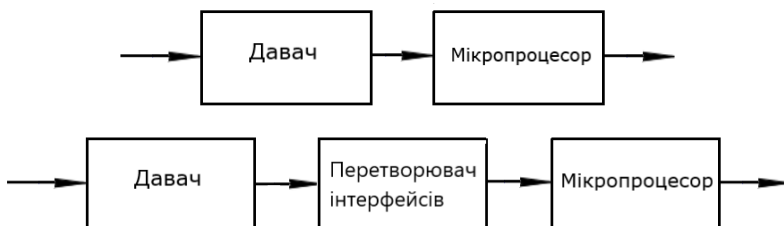


Рис. 5.3 Підключення давача рівня з цифровим вихідним сигналом

Приклади. Рівнеміри ємнісні VEGACAL (VEGA Grieshaber KG Німеччина) застосовують для вимірювання рівня сипких продуктів і рідин. Давач і резервуар утворюють два електроди конденсатора. Зміна рівня продукту призводить до зміни ємності конденсатора, який підключено до перетворювача, що формує уніфікований вихідний сигнал. Зонди мають тросове або стержневе виконання. Вихідний сигнал: 4–20 мА/HART, Profibus PA, Foundation Fieldbus.

Рівнемір VEGACAL 65 з частково ізольованим тросовим зондом (рис. 5.4, а) призначено для вимірювання рівня (до 32 м) сипких продуктів і непровідних рідин.

Рівнемір *VEGACAL 63* з ізолюваним стержневим зондом (рис. 5.4, б) призначено для вимірювання рівня (до 6 м) електропровідних рідин. Ізоляційний матеріал *PE, PTFE*.

Рівнемір *VEGACAL 69* з подвійним стержневим ізолюваним зондом (рис. 5.4, в) призначено для вимірювання рівня (до 4 м) корозійних рідин. Температура середовища $-50...+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, тиск середовища $-100...+200\text{ кПа}$. Ізоляційний матеріал *PTFE, PP, FEP*.

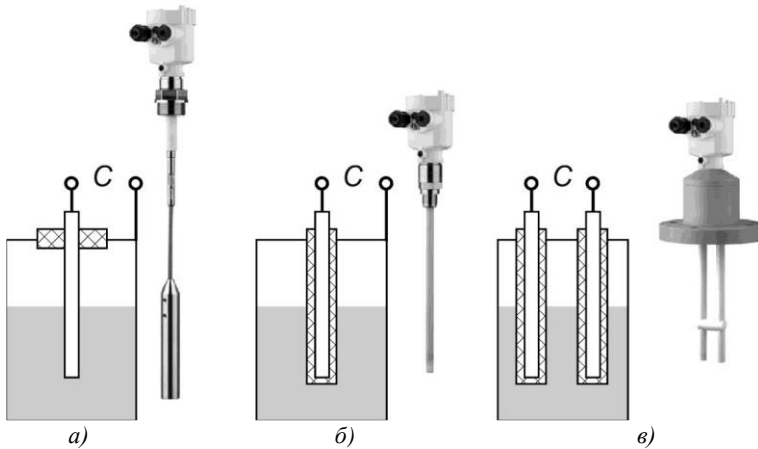


Рис. 5.4 Ємнісні рівнеміри

а) – *Vegascal 65* для непровідних рідин; б) – *Vegascal 63* для електропровідних рідин; в) – *Vegascal 69* для агресивних рідин

5.3 Завдання

Підібрати технічні засоби для реалізації цифрової системи вимірювання рівня, навести технічні характеристики, схеми підключення (згідно завдання виданого викладачем).

5.4 Контрольні запитання

1. Як здійснюється вибір датчиків рівня?
2. Як розрізняють рівнеміри за характером роботи?
3. Які існують варіанти підключення датчика до мікропроцесорного вимірювального приладу залежно від його вихідного сигналу?

Практична робота №6. Корекція результатів вимірювань

6.1 Мета роботи

Вивчити спосіб корекції результатів із врахування параметрів, що впливають на вимірювання.

6.2 Теоретичні відомості

Зв'язок між вихідним сигналом x_1 вимірювального перетворювача (ВП) та сигналом на його вході x , без врахування динаміки, визначається повною статичною характеристикою

$$x_1 = f(x, z) \quad (6.1)$$

У цьому виразі функція f є неперервною та диференційованою за всіма своїми аргументами, а z – вектор величин, що впливають на вимірювання.

Однозначна залежність між вихідним сигналом ВП і значенням вимірюваного параметра існує лише за умови постійних значень величин, що впливають на вимірювання. Для забезпечення однозначної відповідності між x_1 та x для кожного ВП у його паспорті вказують номінальні значення величин впливу z_j^0 . При підстановці в рівняння статичної характеристики ВП (6.1) номінальних значень величин, що впливають на вимірювання, одержують номінальну статичну характеристику ВП

$$x_1 = f(x, z^0) = f_0(x) \quad (6.2)$$

Операцію аналітичного градування виконують з використанням градуовальної характеристики ВП, що є оберненою функцією до його номінальної статичної характеристики (6.2):

$$x^G = f_0^{-1}(x_1) \quad (6.3)$$

де x^G – значення вимірюваної величини, визначене за значенням сигналу вимірювальної інформації x_1 , відповідно до градуовальної характеристики ВП.

Зрозуміло, що застосування аналітичного градування ВП

дає можливість визначити за сигналом x_1 дійсне значення вимірюваного параметра x тільки тоді, коли перетворення x у сигнал x_1 виконано відповідно до номінальної статичної характеристики ВП (6.2), тобто при виконанні умови

$$z = z^0 \quad (6.4)$$

Так як на виробництві важко, а часом і неможливо здійснити стабілізацію всіх величин, що впливають на вимірювання, при їх номінальних рівнях, то при порушенні умови (6.4) з'являється додаткова похибка результатів вимірювання

$$\Delta x^r = f_0^{-1}(\tilde{x}_1) - x,$$

де $\tilde{x}_1 = f(x, z^0 + \Delta z)$; Δz – вектор відхилень впливових величин від номінальних значень.

За порушення умови (6.4) справжнє значення вимірюваної величини x можна знайти за допомогою функції, оберненої повної статичної характеристики ВП

$$x = f^{-1}(\tilde{x}_1). \quad (6.5)$$

Істинне значення величини x , що вимірюється, можна знайти й іншим шляхом – через визначення величини x^r за виразом (6.3) і множення її на деякий коефіцієнт корекції $k_{кор}$:

$$x = x^r \cdot k_{кор}. \quad (6.6)$$

На підставі (6.3), (6.5), (6.6) отримаємо

$$k_{кор} = \frac{f^{-1}(\tilde{x}_1)}{f_0^{-1}(\tilde{x}_1)} \quad (6.7)$$

Приклад. При вимірюванні витрати перегрітої пари, що виробляється парогенератором, суттєвий вплив на результати вимірювань чинить зміна температури і тиску пари, тому що змінюється густина контрольованого середовища. Розглянемо застосування описаного вище способу корекції результатів вимірювань на прикладі вимірювання масової витрати перегрітої пари.

Масову витрату пари при її вимірюванні за допомогою

витратоміра змінного перепаду тиску можна визначити за функцією, зворотної повної статичної характеристики витратоміра

$$Q = k_0 \sqrt{\rho \cdot \Delta P}, \quad (6.8)$$

де ΔP – перепад тиску на диференціальному манометрі витратоміра; ρ – густина перегрітої пари; k_0 – коефіцієнт витрати.

Для перегрітої пари густина залежить від тиску і температури, тому коефіцієнт корекції знайдемо поділом виразу (6.8) на градууювальну характеристику $Q = k \sqrt{\rho \cdot \Delta P}$.

З урахуванням (6.7) $k_{кор} = \sqrt{\rho/\rho_0}$. Для перегрітої пари при зміні тиску в межах 10...15 МПа та зміні температури від 500°C до 600°C значення її густини може бути визначено за наступним апроксимуючим виразом

$$\rho = \frac{10,1 \cdot P(0,9 \cdot t - 110)}{(0,9 \cdot t - 110)(0,00474 \cdot t + 1,283) - 10,2 \cdot P}, \quad [\text{кг/м}^3]$$

Маючи функціональну залежність густини перегрітої пари від тиску і температури та визначивши для їх номінальних значень ρ_0 , можна розрахувати поточне значення фактичної густини пари ρ , а потім і коефіцієнт корекції $k_{кор}$. При відомому коефіцієнті $k_{кор}$ корекція вимірювання масової витрати перегрітої пари здійснюється згідно виразу (6.6).

6.3 Завдання

Застосувати спосіб корекції результатів вимірювань на прикладі вимірювання технологічного параметра (згідно завдання виданого викладачем).

6.4 Контрольні запитання

1. Як маючи коефіцієнт корекції знайти істинне значення вимірюваної величини?
2. Що таке статична характеристика вимірювального перетворювача?
3. Що таке градууювальна характеристика вимірювального перетворювача?

Література

1. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник / Є. С. Поліщук та ін. ; за ред. проф. Є. С. Поліщука ; 2-ге вид., доп. та переробл. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. 544 с.
2. Контрольно-вимірювальні прилади систем керування / М. В. Лукінюк та ін. Київ : «Видавництво “Науковий світ”», 2016. 649 с.
3. Дорожовець М. М., Мокрицький В. О. Аналого-цифрові перетворювачі : навчальний посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. 120 с.
4. Вимірювальні перетворювачі (сенсори) : підручник / В. М. Ванько та ін.; за ред. проф. Є. С. Поліщука та В. М. Ванька. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. 584 с.
5. Ельперін І. В., Пупена О. М., Сідлецький В. М., Швед С. М. Автоматизація виробничих процесів : підручник. Вид. 2-ге, виправлене. Київ : Вид. Ліра-К, 2023. 378 с.
6. Клименко О. П., Каюн І. Г., Шейкус А. Р. Контроль і управління технологічними процесами : навчальний посібник. Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2019. 179 с.