

А.М. Коваль

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

Розглядається реалізація безінерційних та високоточних гігрометрів, принцип дії яких базується на запропонованому автором методі визначення вологості повітря за результатами вимірювання швидкості акустичних коливань в досліджуваному об'ємі повітря.

1. Фізика вологого повітря

Для багатьох технологічних процесів текстильної, хімічної та біомедичної промисловостей дуже актуальною є інформація про вміст водяної пари у повітрі [1, 3]. В зв'язку з тим, що водяна пара та повітря при атмосферних умовах із-за великих міжмолекулярних відстаней не взаємодіють, кожен із газів веде себе в об'ємі так, неначе інший газ відсутній [1]. Рівняння газового стану можна застосувати для кожного окремого газу у суміші:

$$P_g V = mRT, \quad (1)$$

де P_g – парціальний тиск компоненти газової суміші;

V – заповнений газом об'єм;

T – абсолютна температура, К;

R – газова стала, рівна 29,27 м/°С для повітря та 47,07 м/°С для водяної пари;

m – маса газу.

Відповідно до закону Дальтона сума парціальних тисків окремих газів є загальним барометричним тиском:

$$P = P_L + P_W, \quad (2)$$

де P – барометричний тиск;

P_L – парціальний тиск повітря;

P_W – парціальний тиск водяної пари.

Парціальний тиск P_W , тобто кількість молекул води в об'ємі, не може бути як завгодно великим. Цьому заважає насичення повітря водяною парою, яке залежить від температури. Водяна пара сама по собі – абсолютно прозорий газ, за котру не слід приймати туман. Туман містить воду у вигляді завислих дрібних крапель рідини і є пересиченою водяною парою. Вміст водяної пари у вологому повітрі визначається за абсолютною вологістю:

$$f = \frac{m_W}{V}, \quad (3)$$

де m_W – маса води, г;

V – об'єм вологого повітря, м³.

В певному об'ємі повітря може міститися обмежена кількість води, яка визначає абсолютну вологість насичення f_S . Остання дуже сильно залежить від температури. Оскільки об'єм повітря залежить від P , значення f визначається величиною загального тиску. Тільки за парціальним тиском водяної пари P_W або за точкою роси однозначно визначається вміст води в одиниці об'єму.

Ще 200 років тому вчені ввели поняття відносної вологості φ , яке визначається відношенням абсолютної вологості вологого повітря до максимально можливого вмісту (насичення) вологи при даній температурі вимірюється у відсотках [1]:

$$\varphi = \frac{f}{f_S} \cdot 100\% = \frac{P_W}{P_{WS}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

де P_{WS} – парціальний тиск водяної пари в стані насичення.

Ця відносна одиниця вимірювання вологості φ виявилася надзвичайно корисною, оскільки поглинання води із вологого повітря матеріалами, а також сприйнятливості живих істот до вологи значно сильніше залежить від відносної вологості, ніж від абсолютної.

Гігроскопічність об'єкта, тобто властивість об'єкта накопичувати вологу із вологого повітря, визначається адсорбцією молекул води поверхнею, після чого вода проникає всередину об'єкта під дією капілярних сил та дифузії. Між вологістю тіл та вологістю повітря встановлюється рівновага, яка описується характерними для кожної речовини ізотермами сорбції. Вони підтверджують, що рівноважний вміст води в об'єкті визначається відносною вологістю повітря, в той час як температура та абсолютна вологість повітря виявляють слабкий вплив на цю рівновагу.

Ізотерми десорбції, які одержані при зниженні вологості повітря, відрізняються від ізотерм сорбції, одержаних при зростанні вологості повітря, наявністю гігроскопічного гістерезису, який пояснюється споживанням енергії для розриву зв'язків молекул води.

2. Існуючі методи вимірювання вологості повітря

Поряд з прямими методами вимірювання вологості повітря, які ґрунтуються або на кількісному виділенні та вимірюванні вмісту води, або на газодинамічних співвідношеннях, існують непрямі методи, які ґрунтуються на вимірюванні впливу вологи на пробний об'єкт або на властивості матеріалу, який використовується як датчик. Методи вимірювання вологості повітря, а також способи реалізації вологомірів повітря (гігрометрів) наведені у табл. 1 [1].

Таблиця 1

| Методи вимірювання | Гігрометр |
|-----------------------|--|
| Прямі методи | |
| 1. Насичення | Гігрометр точки роси LiCl-гігрометр точки роси |
| 2. Випаровування | Психрометр |
| 3. Абсорбція | Об'ємний Електролізний Конденсатний |
| 4. Енергетичний | Інфрачервоний Мікрохвильовий Електророзрядний Дифузійний |
| Непрямі методи | |
| 1. Гігроскопічний | Плівковий електрокондуктометричний Волосяний Біморфний Зі зміною кольору Кварцевий Гравіметричний |

Вологість повітря в області температур від -20°C до $+25^{\circ}\text{C}$ може бути виміряна при максимальних лабораторних затратах з точністю, яка не перевищує $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ температури точки роси або $\pm 0,5\%$ відносної вологості.

Недоліками гігрометрів, які застосовуються у промисловості є:

- велика інерційність (час встановлення показів декілька хвилин);
- висока вартість первинних перетворювачів (електроди сенсорів виготовляються із благородних металів – *Au, Pt, Rh*);
- необхідність захисту від впливу агресивних середовищ та пилу.

3. Ультразвуковий метод вимірювання вологості повітря

Відомо, що швидкість звукових коливань у повітрі залежить від вмісту в ньому парів води – швидкість зростає на $0,05\text{ м/с}$ при збільшенні в об'ємі водяної пари на $0,10\%$ [2]. Найкраще значення швидкості звуку у повітрі *C*, одержане Харді, Телфером та Пільмейером [5] для сухого повітря при 0°C та вмісті в об'ємі $0,03\%$ CO_2 , дорівнює $331,46\text{ м/с}$. Автори дають при цьому такі поправки:

- а) температурний коефіцієнт: $+0,607\text{ м/с}$ на 1°C при 0°C ;
- б) дисперсія: швидкість збільшується на $0,09\text{ м/с}$ при частотах, більших частоти, яка відповідає максимуму поглинання [6];

в) вміст CO_2 : швидкість зменшується на 0,02 м/с при збільшенні в об'ємі вмісту CO_2 на 0,03 %;

г) в області температур 0–25° С спостерігається збільшення швидкості порядку 0,04 м/с, яке обумовлене відступами від законів ідеального газу і має вигляд \sqrt{T} .

д) вплив тиску: Ходж (1937) одержав такі дані про зміну швидкості звуку в залежності від тиску при 27° С (табл. 2):

Таблиця 2

| | | | | | |
|----------------------------|---|-------|-------|-------|-------|
| Тиск, МПа·10 ⁻¹ | 1 | 10 | 20 | 50 | 100 |
| Відносна швидкість звуку | 1 | 1,003 | 1,008 | 1,024 | 1,064 |

Знайдемо крутості залежності швидкостей звуку у повітрі від вологості S_φ та температури S_T :

$$S_\varphi = \frac{\Delta C_\varphi}{\Delta \varphi} = \frac{0,05 \left[\frac{\text{м/с}}{\%} \right]}{0,10 [\%]} = 0,5 \left[\frac{\text{м/с}}{\%} \right], \quad (5)$$

$$S_T = \frac{\Delta C_T}{\Delta T} = \frac{0,607 \left[\frac{\text{м/с}}{^\circ\text{C}} \right]}{1 [^\circ\text{C}]} + \frac{0,4 \left[\frac{\text{м/с}}{^\circ\text{C}} \right]}{25 [^\circ\text{C}]} = 0,609 \left[\frac{\text{м/с}}{^\circ\text{C}} \right]. \quad (6)$$

Аналіз співвідношення (5) показує, що в основу запропонованого нижче методу вимірювання вологості повітря доцільно покласти залежність швидкості звуку у повітрі від його вологості.

Співвідношення (6) показує, що великий вплив на результати вимірювання вологості повітря має температура середовища.

Отже, для усунення впливу температури на результати вимірювань необхідно забезпечити інваріантність показів гігрометра до температури.

Побудова вимірювальних систем, що називаються інваріантними до дії зовнішніх збурень, базується на розробленому академіком Б.П. Петровим принципі двоканальності (багатоканальності) передачі збурень у системі [4]. Це означає, що для компенсації додаткових похибок, які виникають під впливом заважаючих чинників (в нашому випадку температури), має існувати якийсь додатковий канал для передачі цих чинників у систему. Запропонований цифровий гігрометр, структура якого наведена на рис. 1, можна реалізувати за двоканальною диференціальною схемою.

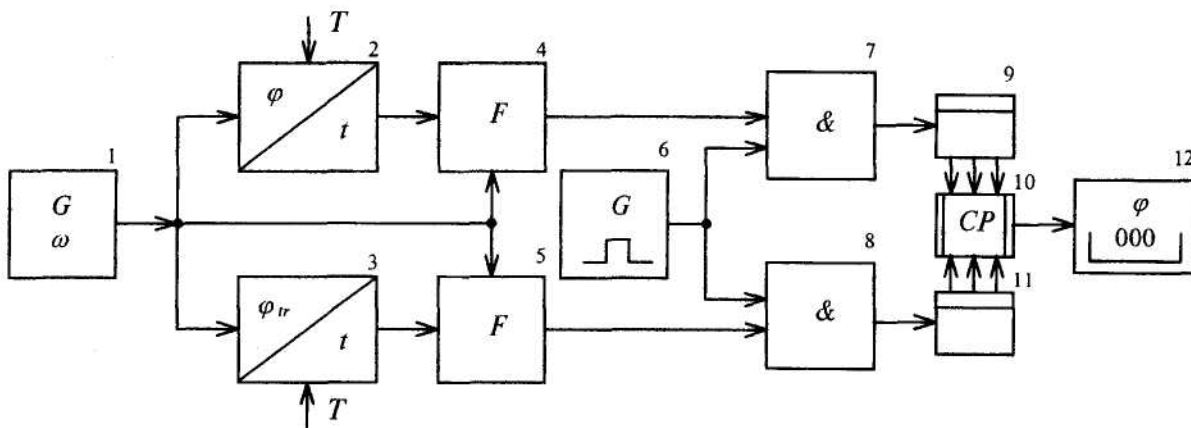


Рис. 1. Структурна схема цифрового ультразвукового гігрометра

Пакети електричних імпульсів з частотою ω надходять з генератора 1 на сенсори 2 і 3, а також на формувачі 4 і 5. Ці коливання перетворюються випромінювачами акустичних коливань сенсорів в ультразвукові коливання повітряних проміжків сенсорів і потрапляють на приймачі сенсорів 2 і 3, де перетворюються на електричні коливання з частотою ω . Конструктивно сенсори 2 і 3 – ідентичні, різниця лише в тому, що сенсор 3 герметичний і вологість повітря його об'єму $\varphi_{tr} = 0\%$, а сенсор 2 має зв'язок з досліджуваним об'ємом повітря. Швидкість поширення акустичних коливань у сенсорі 2 залежатиме як від вологості досліджуваного повітря, так і від його температури, а в сенсорі 3 – тільки від температури.

Формувачі 4 і 5 (тригери) виробляють прямокутні імпульси, тривалість яких пропорційна часу проходження акустичних коливань в сенсорах. Ці дозволяючі імпульси надходять на одні входи схем "Г" 7 і 8, на інші входи яких поступають лічильні імпульси генератора 6. В результаті лічильниками 9 і 11 фіксуються коди, які несуть інформацію про параметри середовищ сенсорів, тобто про вологість і температуру. Обчислювальний блок 10 запам'ятовує ці коди і обчислює їх різницю, тобто код на виході блоку 10 несе інформацію тільки про вологість повітря, ця інформація відображається блоком індикації 12.

Таким чином, запропонований метод вимірювання вологості повітря, який базується на визначенні швидкості акустичних коливань в досліджуваному об'ємі, дає можливість створення практично безінерційних та високоточних гігрометрів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Измерения в промышленности: Справ. изд. в 3-х кн. Способы измерения и аппаратура: Пер. с нем. / Под ред. П.Профоса. – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
2. Кей Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных / Пер. с англ. под ред. К.П. Яковлева. – М.: Физматгиз, 1962. – 246 с.
3. Берлинер М.А. Измерения влажности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
4. Високоточні засоби вимірювання фізичних величин із самоналагодженням і автокорекцією похибок: Навч. посібник / П.М. Таланчук, Ю.О. Скрипник, В.О. Дубровний. – К.: ІЗМН, 1996. – 672 с.
5. Hardy H.C., Telfair D., Pielemeier W.H. Journal Acoust Soc. Amer. 1941. – Vol. 13. – P. 226.
6. Evans E.J., Bazley E.N. // Acoustica, 1956. – Vol. 6. – P. 238–241.

КОВАЛЬ Аркадій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації і комп'ютеризованих технологій Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- радіофізика та електроніка;
- математичне моделювання технічних систем;
- метрологія.