

АКУСТИЧНИЙ ГАЗОАНАЛІЗАТОР

ACOUSTICAL GAS ANALYZER

*Рак В.С., к.т.н. доц., Луцик Я.Т., д.т.н. проф.
Національний університет «Львівська політехніка», Україна
Volodymyr Rak, Ya.Lutsyk,
Lviv Polytechnic National University, Ukraine; e-mail: rakvs@ukr.net*

Анотація

Запропонований метод вимірювання відносних концентрацій складових двох та трьохкомпонентних сумішей газів, в основі роботи якого лежить залежність швидкості поширення звуку від таких параметрів, як молярна маса газів у суміші, їх відносна концентрація, теплоємність за сталого тиску, теплоємність за сталого об'єму та абсолютна температура. Для підвищення точності запропоновано перейти від вимірювань швидкості до вимірювань частоти. Показано, що за сталої довжини хвилі частота акустичного резонатора буде лінійно зростати відповідно до зміни швидкості поширення звуку у газовій суміші. Запропонований та перевірений алгоритм програми визначення концентрацій дво та трикомпонентних сумішей газів за резонансною частотою. Показано, що основними чинниками, що впливають на точність вимірювань, є шуми автогенератора та добротність акустичного резонатора. Запропоновано математичну модель і показано що акустичні газоаналізатори відносно простої конструкції можуть забезпечувати прийнятну точність.

Abstract

Method of measuring the relative component concentrations of two and three-component gas mixtures is proposed. The dependences of the sound velocity on the molar mass, the relative concentration, the heat capacity at constant pressure, the heat capacity at a constant volume and the absolute temperature of the gases in the mixture form the basis of the method. To improve accuracy, the change of measuring the speed on the measuring the frequency is proposed. It is shown that at constant wavelengths the frequency increases linearly with sound velocity at the gas mixture in the acoustic resonator. The program algorithm was created with the help of Mathcad 2001 Professional. It permits the determination of three component gaseous mixture concentration at the measured frequency. First, the frequency value inherent to this mixture is compared with the values in the table. Two closest values are selected. The change in relative concentrations of gases is determined by these values. This change is split into 10 intervals. The frequency values for each interval are calculated. These frequencies are compared with the measured values. Again, there are two closest values and the cycle is repeated. In such a way the nearest frequency increment band is narrowed in 3-orders magnitude after three iterations. Change in the concentration of particular gases could be 80% between the adjacent rows of the table. Reached value of gas concentration is one thousand times smaller than the band (0.8%) after the third iteration. The number of iterations is unlimited for this algorithm and is given in advance. The two main factors affect the accuracy of measurements. They are the quality and the noise of the auto generator. The most common definition of Q is the ratio of the energy accumulated in the oscillation to the losses of this energy. This definition determines the design of an acoustic resonator. It should be such that the acoustic oscillations in it do not lose energy. This is necessary to ensure a high-quality resonator.

Ключові слова

Газоаналізатор, Відносна концентрація, Резонансна частота, Акустичний резонатор, Автогенератор, Добротність резонатора, Трикомпонентна суміш газів

Key words

Gas Analyzer, Relative Concentration, Resonance Frequency, Acoustic Resonator, Auto Generator, Q-factor of a Resonator, Three-component Gas Mixture

1. Вступ

Газоаналізатори застосовують у наукових дослідженнях та у промисловості для контролю складу газових середовищ у технологічних процесах, для вимірювань концентрацій гранично допустимих значень в пожежо- і вибухонебезпечних виробництвах, у приміщеннях, шахтах, де можливе скупчення шкідливих для здоров'я персоналу газів, в екологічних дослідженнях для визначення вмісту атмосфери.

Таке широке застосування газоаналізаторів зумовлює актуальність залучення нових методів аналізу складу газових сумішей, спрощення будови та зменшення вартості газоаналізаторів без втрати точності.

Газоаналізатори поділяються на одно- та багатокомпонентні. Однокомпонентні газоаналізатори вимірюють концентрацію одного складника газової суміші [1], а багатокомпонентні визначають концентрацію декількох складників. Зазвичай кількість складників суміші, концентрації яких може визначити багатокомпонентний газоаналізатор не перевищує п'яти.

Донедавна окремі газоаналізатори сполучали і створювали вимірювальні системи з десятків таких приладів і таким чином створювали багатокомпонентні газоаналізатори.

За принципом дії газоаналізатори поділяють на магнітні, термокондуктометричні, термохімічні, пневматичні, інфрачервоні та ультрафіолетові. [2].

З перерахованих за принципом дії газоаналізаторів всі, окрім магнітних, функціонують за диференційними схемами. Це означає, що у своїй структурі вони містять робочі та порівняльні кювети. Робоча кювета заповнюється сумішшю зі складником, концентрацію якого треба визначити, а у порівняльній згаданий складник відсутній. Диференційний чутливий елемент за певними фізичними властивостями (теплопровідністю, виділенням тепла під час спалювання у кисні, поглинанні атомами та молекулами газів інфрачервоного та ультрафіолетового випромінювання) визначає концентрацію складника у досліджуваній суміші.

Із зазначених вище диференційних газоаналізаторів лише ультрафіолетові та інфрачервоні з певним застереженням можна назвати багатокомпонентними.

Вони теж працюють за диференційною схемою і містять у собі порівняльну кювету зі зразковою сумішшю та кілька джерел випромінювання і фотоприймачів. Між джерелами та приймачами оптичного випромінювання встановлено робочу кювету з досліджуваною сумішшю. За зменшенням інтенсивності випромінювання для певних довжин хвиль можна зробити висновок про вміст газової суміші.

2. Недоліки

Наявність диференційної схеми значно ускладнює будову газоаналізаторів. Два вимірювальні канали (робочий та порівняльний) роблять їх громіздкими і збільшують їх вартість. Крім того, диференційні газоаналізатори у разі дослідження суміші іншого вмісту потребують заміни порівняльних кювет, що ускладнює їх експлуатацію та збільшує вартість.

3. Мета роботи

Метою роботи є вдосконалення методів визначення вмісту складних газових сумішей та шляхів створення зручного у експлуатації, простого та дешевого газоаналізатора.

4. Матеріали та методи

Спрощення конструкції та простоти експлуатації планується досягнути за рахунок вилучення порівняльної кювети, що усуває необхідність мати великий набір порівняльних кювет з різними сумішами газів.

Для вирішення поставленого завдання пропонується використати залежність швидкості поширення акустичних коливань від концентрації складових суміші газу [3]. В ідеальних газах за заданої температури вона не залежить від тиску. Цю залежність досить добре описує вираз

$$v = \sqrt{\frac{RT}{\sum x_i M_i} \cdot \frac{\sum x_i C_p}{\sum x_i C_v}}, \quad (1)$$

де v – швидкість поширення акустичних коливань; R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура; M – молярна маса газу кг/моль; x_i – відносна концентрація i -го газу ($\sum x_i = 1$); C_p – теплоємність газу за сталого тиску; C_v – теплоємність газу за сталого об'єму $C_v = C_p - R$.

Для суміші з азоту, кисню та водню для можливих значень відносної концентрації від 0 до 1 з кроком 0,1 за (1) визначено 57 значень швидкості звуку. Нижче подано фрагмент таблиці концентрацій та швидкостей, розташованих в порядку зростання швидкості.

Таблиця 1. Зростання швидкості звуку в залежності від відносної концентрації газів.

Table 1. Growth of sound speed depending on the relative concentration of gases.

	N ₂	O ₂	H ₂	V м/с
0	0	1	0	235.0645
1	0.1	0.9	0	236.5262
2	0.2	0.8	0	238.0161
3	0.3	0.7	0	239.535
4	0.4	0.6	0	241.0839
5	0.5	0.5	0	242.6638
6	0.6	0.4	0	244.2757
7	0.7	0.3	0	245.9207
8	0.8	0.2	0	247.6
9	0.1	0.8	0.1	248.5725
10	0.9	0.1	0	249.3148
11	0.2	0.7	0.1	250.3065
12	1	0	0	251.0664
13	0.3	0.6	0.1	252.078
14	0.4	0.5	0.1	253.8882
15	0.5	0.4	0.1	255.7387

Із зазначеної таблиці, можна з певною точністю визначити відносні концентрації газів на підставі вимірювань значень швидкості. Для деяких значень швидкості похибка може сягати 10%, але є випадки, коли зростання швидкості на 1 – 2 м/с відповідає зміні концентрації 80 % (8, 9, 10, 11, 12, 13 рядки таблиці 1). У такому випадку діапазон швидкостей між обома сусідніми рядками доцільно ділити ще на 10 частин, розділивши відповідно і значення відносних концентрацій газу. Після такого розділення виникає інша проблема.

Наприклад, різниця між швидкостями у дев'ятому і десятому рядках становить 0,74 м/с, а це означає що при таких швидкостях та різниці між ними, ми повинні здійснювати вимірювання швидкості з похибкою $\frac{0.74}{248.57}100\% = 0,3\%$.

Якщо діапазон швидкостей розбити ще на десять значень, то тоді вимірювання необхідно проводити з похибкою 0,03%. Щоб усунути цю проблему доцільно перейти до частотних вимірювань.

Відомо, що автогенератор повинен містити два основних елементи – схему підсилення та елемент зворотного зв'язку. Схема підсилення визначає амплітуду коливань на виході автогенератора. Елемент зворотного зв'язку визначає частоту вихідного сигналу. Для збудження коливань в автогенераторі необхідно забезпечити дві умови: амплітудну та фазову. Для замкнутого зворотного зв'язку коефіцієнт передачі схеми підсилення та елемента зворотного зв'язку повинен бути більшим або тотожним одиниці

$$K \cdot \beta \geq 1, \quad (2)$$

де K – коефіцієнт передачі схеми підсилення; β – коефіцієнт передачі елемента зворотного зв'язку.

Другою умовою є забезпечення необхідного фазового зсуву в автогенераторі. Для при замкнутого зворотного зв'язку

$$\varphi_K + \varphi_\beta = 2m\pi, \quad (3)$$

де φ_K - фазовий зсув схеми підсилення, $\varphi_K \approx 0$; φ_β – фазовий зсув елемента зворотного зв'язку;
 $m = 1, 2, 3, \dots$

З (3) видно, що фазовий зсув елемента зворотного зв'язку повинен бути кратним 2π .

Визначимо який фазовий зсув буде виникати при проходженні акустичною хвилею шляху, що дорівнює її довжині. Відомо, що

$$\lambda = \nu \cdot T, \quad (4)$$

де λ – довжина хвилі; T – її період, $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Тоді

$$\lambda = \frac{v2\pi}{\omega}, \quad (5)$$

де ω – кутова швидкість.

Якщо

$$\omega = \frac{\varphi}{T}, \quad (6)$$

де φ – фазовий кут, який виникає за період T при кутовій швидкості ω .

Підставивши у (5) (6) отримаємо

$$\varphi = \frac{2\pi v T}{\lambda}. \quad (7)$$

При довжині хвилі λ з врахуванням (4) отримаємо

$$\varphi(\lambda) = 2\pi. \quad (8)$$

Отже, при відстані між джерелом звуку та його приймачем, яка дорівнює довжині хвилі, завжди буде виконуватись фазова умова збудження генератора на відповідній частоті. Однак для різних сумішей газу швидкість звуку є різною. Різною буде і довжина хвилі. Ми не можемо для кожної швидкості звуку змінювати відстань між джерелом та приймачем. Було б доцільно залишати довжину хвилі сталою, а в залежності від швидкості звуку змінювати його частоту. Тоді довжина хвилі λ і швидкість звуку v будуть зв'язані з його частотою F наступним співвідношенням

$$F = \frac{1}{\lambda} \cdot v. \quad (9)$$

Отже для того, щоб довжина хвилі залишалася сталою, за зростання швидкості звуку повинна зростати частота. Для швидкостей поданих у таблиці 1 та сталої довжини хвилі у таблиці 2 подано фрагмент матриці концентрацій та частот, розташованих в порядку зростання частот. Після складання такої таблиці встановлено, що для довжини хвилі $\lambda=0,1$ м, мінімальне значення частоти дорівнює 2350,6 Гц, а максимальне 9383,6 Гц.

Таблиця 2. Фрагмент матриці концентрацій та частот.
Table 2. A fragment of the matrix of concentrations and frequencies.

	N ₂	O ₂	H ₂	F Гц
0	0	1	0	2.3506 · 10 ³
1	0.1	0.9	0	2.3653 · 10 ³
2	0.2	0.8	0	2.3802 · 10 ³
3	0.3	0.7	0	2.3953 · 10 ³
4	0.4	0.6	0	2.4108 · 10 ³
5	0.5	0.5	0	2.4266 · 10 ³
6	0.6	0.4	0	2.4428 · 10 ³
7	0.7	0.3	0	2.4592 · 10 ³
8	0.8	0.2	0	2.476 · 10 ³
9	0.1	0.8	0.1	2.4857 · 10 ³
10	0.9	0.1	0	2.4931 · 10 ³
11	0.2	0.7	0.1	2.5031 · 10 ³
12	1	0	0	2.5107 · 10 ³
13	0.3	0.6	0.1	2.5208 · 10 ³
14	0.4	0.5	0.1	2.5389 · 10 ³
15	0.5	0.4	0.1	2.5574 · 10 ³

За інтервалу вимірювання 1 с сучасні засоби з високою точністю вимірюють частоту до 0,1 Гц. Зокрема частоту 2350 Гц можна виміряти з похибкою $\frac{0.1}{2350} \cdot 100\% = 4 \cdot 10^{-3}\%$. Для зазначеного вище частотного діапазону придатна значна кількість існуючих джерел та приймачів звуку, тому їх можна застосувати у газоаналізаторі. Структурна схема акустичного газоаналізатора зображена на рис. 1.

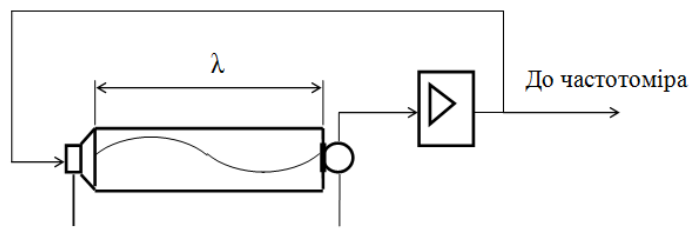


Рис. 1. Структурна схема акустичного газоаналізатора.

Figure. 1. Structural scheme of the acoustic gas analyzer.

Він працює як автогенератор, з активним передавальним елементом з коефіцієнтом передачі більшим одиниці (амплітудна умова) та фазо- або частото-задаючим елементом (фазова умова) у зворотному зв'язку [4]. Газоаналізатор містить акустичний резонатор довжиною λ . З одного боку резонатора встановлено джерело звуку, яке позначено на схемі як гучномовець, а з іншого приймач, позначений як мікрофон. Вихід приймача звуку під'єднаний до входу підсилювача. Сигнал з виходу підсилювача розгалужується. Одна частина його енергії подається на джерело звуку, встановлене у акустичному резонаторі, інша частина подається на вхід частотоміра для вимірювання частоти. За коефіцієнта підсилення, достатнього для забезпечення амплітудної умови збудження коливаль (фазова умова забезпечується автоматично) у резонаторі виникнуть акустичні коливання, частота яких буде залежати від швидкості звуку у газовій суміші та від вмісту компонентів. Частоту, властиву даній суміші газів, визначає частотомір, під'єднаний до комп'ютера через інтерфейс.

Із залученням програмного забезпечення Mathcad [5] промодельовано алгоритм програми, яка повинна за виміряною частотою визначати концентрації газів суміші з трьох компонентів. Алгоритм програми є наступним. Спочатку порівнюється виміряне, властиве даній суміші, значення частоти зі значеннями з таблиці 2. Вибираються два найближчі до цього значення, одне з яких більше виміряного а друге менше. За цими значеннями визначається інтервал відносних концентрацій газів. Цей інтервал розбивається на 10 частин, для кожної з яких вираховуються значення частоти, які порівнюються з виміряним значенням. Далі знову визначають два найближчих значення і цикл повторюється. Таким чином за три ітерації інтервал частот між найближчими значеннями до виміряного значення частоти зменшується у 1000 разів. Якщо спочатку зміна концентрацій окремих газів між сусідніми рядками могла становити 80% (див. таблицю 2), то після трьох ітерацій істинне значення концентрації газу перебуває у тисячу разів меншому інтервалі (0,8%). У випадку, коли виміряне значення частоти точно збігається з

табличним значенням, програма відразу видає значення концентрацій газів. Алгоритм розроблений таким чином, що кількість ітерацій є необмеженою і задається наперед. Таким чином визначати концентрації складників газової суміші за значенням частоти резонатора ми можемо з будь-якою точністю. Виникає питання, *наскільки резонансна частота відповідає складу суміші, і якщо не відповідає, то чим спричинені її відхилення від істинного значення?*

Відомо, що основним чинником, який визначає значення резонансної частоти автогенератора є частота, на якій коефіцієнт передачі частото-задаючого елемента є максимальним. Ще одним чинником, що впливає на резонансну частоту є добротність частото-задаючого елемента. Чим вона вища, тим стабільніший автогенератор. Найзагальнішим визначенням добротності є відношення кількості енергії накопиченої в коливанні, до втрат цієї енергії за один період. Це означення визначає конструкцію акустичного резонатора. Для високої добротності він повинен бути таким, щоб акустичні коливання, які виникають в ньому, не втрачали енергії. Втрати енергії можна зменшити наступним чином:

- Акустичні хвилі не повинні виконувати механічної роботи, тобто на корпус резонатора не повинні передаватись акустичні вібрації. Це може бути у тому випадку, коли корпус резонатора виготовлений з матеріалу, який є масивним і не піддається механічним впливам. Таким матеріалом може бути латунь, сталь і т.д.
- Для зменшення втрат енергії не тільки за рахунок матеріалу, а і в самому резонаторі, необхідно щоб внутрішня поверхня резонатора була полірована. Тоді можна уникнути небажаних завихрень газу біля стінок резонатора.
- У джерелі та приймачі акустичних коливань втрати механічної енергії мають бути мінімальними.

Для мінімізації втрат енергії у резонаторі традиційні динаміки не бажано використовувати через значну амплітуду їх коливань. Акустичні хвилі будуть діяти на них і виконувати якусь роботу. Для її зменшення джерело та приймач повинні бути жорсткими настільки, щоб під дією акустичних хвиль їх геометричні розміри не змінювались, тобто акустичні хвилі повинні виконувати мінімальну механічну роботу. Виходячи з цього, доцільніше застосувати п'єзокерамічні акустичні резонатори з коливаннями зсуву по товщині, які можуть функціонувати у діапазоні від сотень кГц до сотень мГц [6]. У таких резонаторах на п'єзокераміку, сформовану у вигляді круглого диску, з обох сторін напілюють електроди, до яких підключають струмопідводи. Добротність таких резонаторів сягає декількох тисяч [6].

Будемо вважати п'єзокерамічний акустичний резонатор коливною системою. Якщо у такій коливній системі вимкнути дію збуджувальної сили [7], то вона перейде у режим вільних коливань амплітуда A яких зменшуватиметься за експонентою

$$A = A_0 \cdot e^{-B \cdot t}, \quad (10)$$

де A_0 – початкове значення амплітуди в момент часу $t = 0$, коли вимкнено збуджувальну силу;

B – коефіцієнт опору.

Запишемо відношення значень амплітуд для відтинку часу за який воно зменшиться в z раз:

$$\frac{A_p}{A_k} = \frac{A_0 \cdot e^{-B \cdot t_1}}{A_0 \cdot e^{-B(t_1 + nT)}} = z, \quad (11)$$

де A_p – амплітуда вільних коливань в початковий момент вимірювання часового інтервалу; A_k – амплітуда вільних коливань в кінцевий момент вимірювання часового інтервалу; n – кількість періодів на інтервалі часу згасання коливань; T – період вільних коливань; Z – відношення амплітуда вільних коливань в початковий момент вимірювання до амплітуда вільних коливань в кінцевий момент вимірювання

Добротність системи [7] зв'язана з частотою вільних коливань ω_0 та коефіцієнтом опору співвідношенням

$$Q = \frac{\omega_0}{2 \cdot B}, \quad (12)$$

де ω_0 – кругова частота вільних коливань; Q – добротність.

Нехай, відповідно до [6], добротність нашого п'єзокерамічного акустичного резонатора $Q=500$, $\omega_0=3,77 \cdot 10^7$ то з (3.3) коефіцієнт опору $B=4,71 \cdot 10^3$

Визначимо відносне зменшення амплітуди у п'єзокерамічному резонаторі за один період з (11). Провівши певні скорочення формула (11) набуде вигляду

$$\frac{1}{e^{-BT}} = k_p \quad (13)$$

де k_p – відносне зменшення амплітуди коливань у п'єзокерамічному резонаторі за один період.

Акустичний резонатор містить два п'єзокерамічних резонатори, загальний коефіцієнт для вказаних Q та ω_0 кожного резонатора рівний k , а загальні втрати амплітуди в обох п'єзрезонаторах становитимуть $k^2=0,9875$.

Оцінимо які втрати енергії (коефіцієнт опору) може створювати сам акустичний резонатор. Якщо площа приймача акустичної енергії буде меншою від площі джерела, то тільки частина акустичної енергії буде потрапляти до приймача, а решта потрапить на стінки резонатора і буде втрачена. Для зменшення цих втрат необхідно, щоб максимальна кількість енергії від джерела акустичних хвиль потрапила на приймач. Тому резонатор повинен бути виготовлений з круглої масивної заготовки, в середині якої повинен бути отвір з діаметром, що рівний діаметрові джерела та приймача акустичних коливань.

Очевидно для того щоб максимальна кількість енергії від джерела потрапляла до приймача, їх діаметри повинні бути однаковими.

З урахуванням сказаного вище, можна зробити висновок, що втрати енергії при проходженні акустичної хвилі від передавача до приймача на відстань 0,1 м будуть незначними і не більшими від втрат у п'єзокерамічному резонаторі. Тоді можна допустити, що загальні втрати амплітуди будуть становити $k_{заг}=k^3=0,981$. Визначимо загальну добротність акустичного резонатора.

$$\frac{1}{e^{BT}} = k_{заг} \quad (14)$$

Після математичних перетворень з (14), визначимо загальний коефіцієнт опору акустичного резонатора.

$$B_{заг} = \frac{\ln \frac{1}{k_{заг}}}{T_{акуст}} = f_{акуст} \cdot \ln \frac{1}{k_{заг}} \quad (15)$$

де $T_{акуст}$ - період акустичних коливань.

З урахуванням того, що $\omega_{акуст} = 2\pi \cdot f_{акуст}$, а $T_{акуст} = \frac{1}{f_{акуст}}$ за формулами (12) та (15), визначимо добротність акустичного резонатора

$$Q_{акуст} = \frac{\omega_{акуст}}{2 \cdot B_{заг}} = \frac{\pi}{\ln \frac{1}{k_{заг}}} \quad (16)$$

З (16) можна зробити висновок, що добротність акустичного резонатора є сталою і не залежить від його резонансної частоти.

Для вказаних вище загальних втрат амплітуди у акустичному резонаторі його добротність $Q_{акуст}=166,7$.

Основними елементами акустичного газоаналізатора слід вважати автогенератор, який складається з активного елемента підсилювача та пасивного елемента, що встановлений в колі зворотного зв'язку – акустичного резонатора.

Формула (3) відображає ідеальні умови роботи автогенератора і містить два чинники. Однак є ще один чинник, який впливає на фазову умову збудження. Таким чинником є шуми підсилювача. З врахуванням цього фактору формула (3) буде мати вигляд

$$\varphi_{\kappa} + \varphi_{\beta} + \varphi_{ш} = 2m\pi \quad (17)$$

$\varphi_{ш}$ – фазовий зсув, утворений шумами.

Оскільки конструкція резонатора розроблена так, щоб мінімізувати втрати у ньому і його загальний коефіцієнт передачі, як елемента зворотного зв'язку є близьким до 1 ($k_{заг}=0,981$), то для забезпечення амплітудної умови збудження нема потреби у великому коефіцієнті підсилення.

П'єзокераміка є хорошим ізолятором, а з обох її сторін напилено збуджуючі електроди, тому у наближенні, п'єзокерамічний резонатор можна вважати конденсатором. Таке джерело акустичних коливань має високий внутрішній опір. Для того, щоб не було втрат, при зчитуванні сигналу з нього, вхідний опір підсилювача повинен бути дуже високим. Згідно [8] запропоновано схему підсилювача з високим вхідним опором. Нехай на виході цієї схеми, при коефіцієнті підсилення, що гарантує збудження автогенератора, середньоквадратичне значення шумів дорівнює $\sigma_{ш}=10$ мВ.

У підсилювачі корисний сигнал, що виникає у результаті генерації та шуми впливають одне на одного. Детермінований корисний сигнал [8], [9], сумується з шумами малої інтенсивності. Це викликає випадкове зміщення фази вихідного сигналу. Нехай детермінований сигнал на виході має максимальну амплітуду $U_0=10$ В. Його середньоквадратичне значення буде дорівнювати $U_{с.кв}=0,707U_0=7,07$ В. Визначимо яке граничне фазове зміщення може спричинити напруга шумів при сумуванні з детермінованим сигналом. Напругу шумів можна розглядати як випадковий процес, одною з характеристик якого є середньоквадратичне значення. Фаза шумів може

мати довільне значення, по відношенню до фази детермінованого сигналу. Коли ці фази збігаються, то це не впливатиме на результуючу фазу вихідного сигналу. Максимальне зміщення буде можливим тоді, коли фаза шуму зміщена по відношенню до фази детермінованого сигналу на $\pi/2$.

Знаючи середньоквадратичне значення напруги шумів, та значення детермінованого сигналу визначимо можливе граничне зміщення фази вихідного сигналу. Для цього скористаємося правилом трьох сігм. При нормальному розподілі напруги шумів та їх середньоквадратичному значенні $\sigma_{U_{ш}}=10$ мВ. З точністю до частини відсотка можна стверджувати, що розкид значень напруги шумів не перевищуватиме $3 \cdot \sigma_{U_{ш}} = 30$ мВ. Максимальне зміщення фази вихідного сигналу спричинене шумами визначимо з виразу

$$\Delta\varphi = \arctg \frac{3\sigma_{U_{ш}}}{U_d} \quad (18)$$

З врахуванням поданих вище значень $U_{c.кв}=7,07$ В, $3 \cdot \sigma_{U_{ш}} = 30$ мВ $\Delta\varphi = 4,24 \cdot 10^{-6}$ рад.

Відомо, що під час резонансу амплітуда коливань зростає до максимального значення, а фазовий зсув між частотою збуджуючої сили та частотою резонатора, змінює своє значення на π . Для вищої добротності резонатора цей перехід стрімкіший (рис. 2).

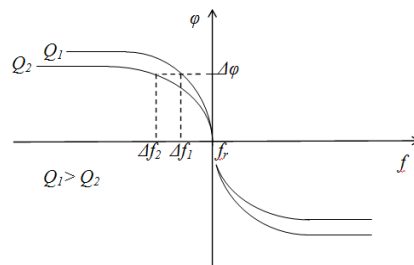


Рис. 2. Фазо – частотна характеристика коливального контура.
Figure 2. Phase - frequency characteristic of oscillatory circuit.

Фазо-частотна характеристика [3] акустичного резонатора апроксимується виразом

$$\varphi(f) = -\text{arccctg} \left[\frac{(2\pi \cdot f_r)^2 - (2\pi \cdot f)^2}{2B \cdot (2\pi \cdot f)} \right] \quad (19)$$

де f_r - резонансна частота; f - частота збудження; B - коефіцієнт опору.

Рівняння (19) описує фазо-частотну характеристику механічної коливної системи. У такій системі під час переходу частоти збудження через значення резонансної частоти фазовий зсув між цими частотами змінює своє значення з 0 на $-\frac{\pi}{2}$.

Для забезпечення фазової умови збудження ми завжди можемо вибрати відповідну довжину акустичного резонатора. У такому випадку фазочастотна характеристика акустичного резонатора, як елемента зворотного зв'язку, буде визначатися співвідношенням

$$\varphi_{ag}(f) = \pi/2 + \varphi(f) \quad (20)$$

Графік цієї характеристики зображений на рис. 3.

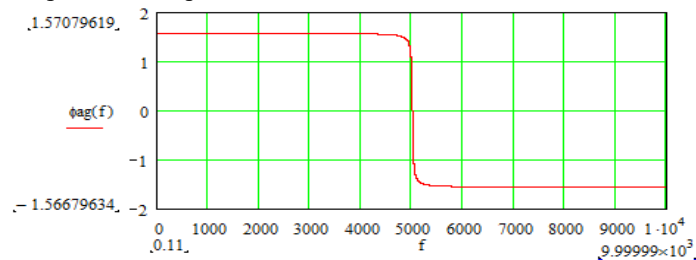


Рис. 3. Фазо-частотна характеристика акустичного резонатора.
Figure 3. Phase-frequency characteristic of acoustic resonator.

Якщо відомі максимальні відхилення фази, спричинені шумами і визначені за (18), можна визначити відхилення від резонансної частоти. Однак для цього ми не можемо скористатися математичними перетвореннями рівняння (19). Це пояснюється тим, що однакове відношення різниці квадратів частот до частоти, що відповідає певному

фазовому зсуву може бути при їх різних значеннях. Тому для визначення частотного відхилення (див. рис. 2 та рис. 3) від резонансної частоти, спричиненого шумами скористаємося графічним методом.

Відхилення частоти були визначені на початку та в кінці частотного діапазону для резонансних частот $f_{min}=2,360$ кГц, та $f_{max}=9,380$ кГц і для частоти, що знаходиться приблизно по середині між цими значеннями $f_{sep}=5$ кГц.

Підставленням визначених відхилень частоти у створену програму оцінимо, яким відхиленням концентрації складових суміші газів це відповідає (див. таб. 3).

Таблиця 3.

Вплив шумів на значення концентрації газу

Частота кГц	Концентрація N ₂ %	Концентрація O ₂ %	Концентрація H ₂ %
2,35997	6,401	93,599	0
2,36003	6,442	93,598	0
4,99994	19,413	0	80,587
5,00006	19,412	0	80,588
9,37988	$6,059 \cdot 10^{-3}$	0	99,994
9,38012	$5,665 \cdot 10^{-3}$	0	99,994

Вибране з таблиці 3 максимальне відхилення концентрації азоту дорівнює 0,04 % для його відносної концентрації 6,44%, що відповідає відносній похибці вимірювання концентрації азоту 0,9 %.

5. Висновки:

- Запропонований метод, який дозволяє, оперативно, з прийнятною точністю, визначати відносні концентрації складових двох і трьох компонентних сумішей газів, в основі роботи якого лежить залежність швидкості поширення звуку від таких параметрів, як абсолютна температура суміші, молярна маса газів, їх відносні концентрації, теплоємності за сталого тиску та сталого об'єму.
- Основними чинниками, які визначають точність акустичних газоаналізаторів є добротність їх резонаторів та шуми у схемі автогенератора.
- У запропонованому методі нема необхідності у використанні порівняльної кювети, що усуває необхідність мати великий набір порівняльних кювет з різними сумішами газів. Для налаштування газоаналізатора на вимірювання суміші з іншими складниками достатньо замінити суміш у акустичному резонаторі та змінити відповідну програму у комп'ютері.

Література

1. Газоанализаторы. / Павленко В.А. — Москва — Ленинград: «Машиностроение», 1965. — 296 с.
2. Дифференциальные детекторы для газовой хроматографии./ Бразжников В. В. — Москва: «Наука», 1974. — 223 с.
3. Застосування ультразвукових сенсорів./ Луцик Я, Буняк Л, Стадник Б. —Львів: СП «БаК»,1998. — 232 с.
4. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник./ Баскаков С. И. —Москва: «Высшая школа», 1988 — 448 с.
5. Mathcad 14./ Кирьянов Д. В. —Санкт-Петербург: «БХВ-Петербург», 2007. — 704 с.
6. Пьезорезонансные датчики./ Малов В.В. —Москва: «Энергоатомиздат», 1989. — 272 с.
7. Курс теоретической механики. Учебник./ Никитин Н.Н. —Москва: «Высшая школа»,1990 — 607 с.
8. Аналоговая электроника на операционных усилителях./ А. Дж. Пейтон, В. Волш. —Москва: «Бином», 1994. — 352 с.
9. Опрацювання результатів вимірювань; Навч. посібник./ Дорожовець М. — Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка»,2007. — 624 с.
10. Уменьшение погрешности генератора полупроводникового резонансного сенсора. / Рак В.С., Байцар Р.И. Датчики и системы. — Москва. —2007.-№6.- С 10-13.

References

- [1] V. Pavlenko, *Gas analyzers*. Moscow – Leningrad, USSR: Mechanical Engineering (in Russian), 1965.
- [2] V. Brazhnikov, *Differential detectors for gas chromatography*. Moscow, USSR: Nauka, (in Russian), 1974.
- [3] Ya. Lutsyk, L. Buniak, B. Stadnyk, *Application of ultrasonic sensors*. Lviv, Ukraine: Joint-Stock Company "BaK", (in Ukrainian), 1998.
- [4] S. Baskakov, *Radio circuits and signals*. Moscow, USSR: Higher school, (in Russian), 1988.
- [5] D. Kiryanov, *Mathcad 14*. St. Petersburg, RF: BHV-Petersburg, (in Russian), 2007.
- [6] V. Malov, *Piezo-resonance sensors*. Moscow, USSR: Energoatomizdat, (in Russian), 1989.
- [7] N. Nikitin, *Course of theoretical mechanics*. Moscow, USSR: Higher school, (in Russian), 1990.

- [8] A. Peyton, V. Volsh, *Analogue electronics on operational amplifiers*. Moscow, RF: Bean, (in Russian), 1994.
- [9] M. Dorozovets, *Processing of measurement results*. Lviv, Ukraine: Publ. House Lviv Polytech. Nat. Univ., (in Ukrainian), 2007.
- [9] V. Rak, R. Baitsar, "Decrease of the errors of the generator of the semiconductor resonance sensor", *Sensors and systems*, Moscow, RF, no.6, p.10-13, 2007.