

# ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

## АКУСТИЧНИЙ ГАЗОАНАЛІЗАТОР

### ACOUSTICAL GAS ANALYZER

*Рак В. С., канд. техн. наук, доц., Луцик Я. Т., д-р техн. наук, проф.*

*кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,*

*Національний університет «Львівська політехніка», Україна; e-mail rakvs@ukr.net*

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.02.013>

**Анотація.** Запропоновано метод вимірювання відносних концентрацій складових дво- та трикомпонентних сумішей газів, оснований на залежності 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 лінійно зростатиме відповідно до зміни швидкості поширення звуку в газовій суміші. Запропоновано та перевірено алгоритм програми визначення концентрацій дво- та трикомпонентних сумішей газів за резонансною частотою. Обґрунтовано, що основними чинниками, що впливають на точність вимірювань, є шуми автогенератора та добротність акустичного резонатора. Запропоновано математичну модель і доведено, що акустичні газоаналізатори порівняно простої конструкції можуть забезпечувати прийнятну точність.

**Ключові слова:** газоаналізатор, відносна концентрація, резонансна частота, акустичний резонатор, автогенератор, добротність резонатора, трикомпонентна суміш газів.

**Annotation.** Method of measuring the relative concentrations of two and three-component gas mixtures components is proposed. The dependence 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 alteration the 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. Determined 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 defines the design of an acoustic resonator. It should be such that the acoustic oscillations that occur in it do not lose energy. This is necessary to ensure a high-quality resonator.

**Key words:** gas analyzer, relative concentration, resonance frequency, acoustic resonator, auto generator, Q-factor of a resonator, three-component gas mixture.

#### 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, у 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 поділяють 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, тобто створювали багатокомпонентні газоаналізатори.

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

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

Із перерахованих вище диференційних газоаналізаторів лише ультрафіолетові та інфрачервоні із певним застереженням можна назвати багатокомпонентними.

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

### Недоліки

Наявність диференційної схеми істотно ускладнює будову газоаналізаторів. Два вимірвальні 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.

### Мета роботи

Мета роботи – вдосконалення методів визначення вмісту складних газових сумішей та створення зручного в експлуатації, простого та дешевого газоаналізатора.

### Матеріали та методи

Спрощення конструкції та простоти експлуатації заплановано досягти за рахунок вилучення порівняльної кювети, у такому разі не потрібен великий набір порівняльних кювет із різними сумішами газів.

Для вирішення поставленого завдання запропоновано 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 доволі 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 із 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 у послідовності зростання швидкості.

Таблиця 1

### Зростання швидкості звуку залежно від відносної концентрації газів

Table 1

### Growth of sound speed depending on the relative concentration of gases

	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	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 табл. 1 можна з певною точністю визначити відносні концентрації газів на підставі вимірювань значень швидкості. Для деяких значень швидкості похибка може сягати 10 %, але інколи зростання швидкості на 1–2 м/с відповідає зміні концентрації 80 % (рядки 8, 9, 10, 11, 12, 13 табл. 1). У такому

випадку діапазон швидкостей між обома сусідніми рядками доцільно ділити ще на десять 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 за таких швидкостей та різниці між ними ми повинні здійснювати вимірювання швидкості з похибкою  $\frac{0.74}{248.57}100\% = 0,3\%$ . Якщо діапазон швидкостей

розділити ще на десять значень, то тоді вимірювання необхідно виконувати з похибкою 0,03%. Щоб уникнути цієї проблеми, доцільно перейти до частотних вимірювань.

Відомо, що автогенератор повинен містити два основні 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 від одиниці або тотожним з нею

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

де  $K$  – коефіцієнт передачі схеми підсилення;  $\beta$  – коефіцієнт передачі елемента зворотного зв'язку.

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

$$j_k + j_b = 2m\pi, \quad (3)$$

де  $\varphi_k$  – фазовий зсув схеми підсилення;  $j_k \approx 0$ ;  $\varphi_b$  – фазовий зсув елемента зворотного зв'язку;  $m = 1, 2, 3, \dots$

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

Визначимо, який фазовий зсув виникатиме, коли акустична хвиля проходить шлях, що дорівнює її довжині. Відомо, що

$$l = v \cdot T, \quad (4)$$

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

Тоді

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

де  $\omega$  – кутова швидкість.

Якщо

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

де  $\varphi$  – фазовий кут, який виникає за період  $T$  за кутової швидкості  $\omega$ .

Підставивши у (5) (6), отримаємо

$$j = \frac{2\pi v T}{l}. \quad (7)$$

Для довжини хвилі  $\lambda$  з урахуванням (4) одержимо

$$j(l) = 2\pi. \quad (8)$$

Отже, якщо відстань між джерелом звуку та його приймачем дорівнює довжині хвилі, завжди виконуватиметься фазова умова збудження генератора на відповідній частоті. Однак для різних сумішей газу швидкість звуку різна. Відрізнятиметься і довжина хвилі. Ми не можемо для кожної швидкості звуку змінювати відстань між джерелом та приймачем. Було б доцільно залишати довжину хвилі сталою, а частоту змінювати залежно від швидкості звуку. Тоді довжина хвилі  $\lambda$  і швидкість звуку  $v$  будуть зв'язані із його частотою  $F$  таким співвідношенням

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

Отже, щоб довжина хвилі залишалася сталою, за збільшення швидкості звуку повинна зростати частота.

Таблиця 2

**Фрагмент матриці концентрацій та частот**

Table 2

**A fragment of the matrix of concentrations and frequencies**

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

Для швидкостей, поданих у табл. 1, та сталої довжини хвилі у табл. 2 подано фрагмент матриці концентрацій та частот, розташованих у послідовності 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.

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 велика кількість джерел та приймачів звуку, тому їх можна застосувати у газоаналізаторі.

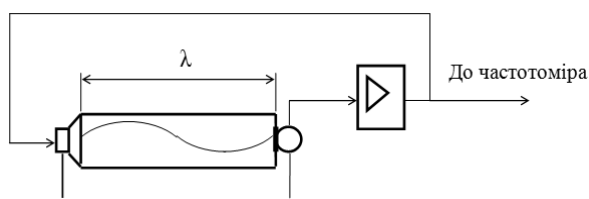


Рис. 1. Структурна схема акустичного газоаналізатора

Fig. 1. Structural scheme of the acoustic gas analyzer

Структурна схема акустичного газоаналізатора зображена на рис. 1. Він працює як автогенератор, з активним передавальним елементом, коефіцієнт передачі якого більший від одиниці (амплітудна умова) та фазо- або частотозадавальним елементом (фазова умова) у зворотному зв'язку [4]. Газоаналізатор містить акустичний резонатор завдовжки  $\lambda$ . З одного боку резонатора встановлено джерело звуку, позначене на схемі як гучномовець, а з іншого приймач, позначений як мікрофон. Вихід приймача звуку під'єднаний до входу підсилювача. Сигнал із виходу підсилювача розгалужується. Одна частина його енергії подається на джерело звуку, встановлене у акустичному резонаторі, інша частина – на вхід частотоміра для вимірювання частоти. За коефіцієнта підсилення, достатнього для забезпечення амплітудної умови збудження коливань (фазова умова забезпечується автоматично), у резонаторі виникнуть акустичні коливання, частота яких залежатиме від швидкості звуку в газовій суміші та від вмісту компонентів. Частоту цієї суміші газів визначає частотомір, під'єднаний до комп'ютера через інтерфейс.

Із залученням програмного забезпечення Mathcad [5] промодельовано алгоритм програми, яка повинна за вимірююю частотою визначати концентрації газів суміші із трьох компонентів. Алгоритм програми такий. Спочатку порівнюють виміряне, притаманне цій суміші, значення частоти зі значеннями з табл. 2. Вибирають два найближчі до

цього значення, одне з яких більше від вимірюючого, а друге менше. За цими значеннями встановлюють інтервал відносних концентрацій газів. Цей інтервал розділяють на десять частин, для кожної з них обчислюють значення частоти, які порівнюють з виміряним значенням. Далі знову визначають два найближчі значення і цикл повторюється. За три ітерації інтервал частот між найближчими значеннями до вимірюючого значення частоти зменшується у 1000 разів. Якщо спочатку зміна концентрацій окремих газів між сусідніми рядками могла становити 80 % (див. табл. 2), то після трьох ітерацій істинне значення концентрації газу перебуває в інтервалі, в тисячу разів меншому (0,8 %). Якщо ж виміряне значення частоти точно збігається з табличним значенням, програма відразу видає значення концентрацій газів. Алгоритм розроблено так, що кількість ітерацій необмежена і задана наперед. Тому визначати концентрації складників газової суміші за значенням частоти резонатора можна з будь-якою точністю. Виникає запитання: *наскільки резонансна частота відповідає складу суміші, і якщо не відповідає, то чим спричинені її відхилення від істинного значення?*

Відомо, що основним чинником, від якого залежить значення резонансної частоти автогенератора, є частота, на якій коефіцієнт передачі частотозадавального елемента максимальний. Ще одним чинником, що впливає на резонансну частоту, є добротність частотозадавального 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 у ньому, не втрачали енергії. Втрати енергії можна зменшити так:

- Акустичні хвилі не повинні виконувати механічної роботи, тобто на корпус резонатора не мають передаватись акустичні вібрації. Це можливо, якщо корпус резонатора виготовлений з матеріалу, який є масивним і не піддається механічним впливам (це може бути латунь, сталь тощо).

- 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 повинні бути мінімальними.

Для мінімізації втрат енергії у резонаторі традиційні динаміки небажано 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 їхні геометричні розміри не змінювались, тобто акустичні хвилі повинні виконувати мінімальну механічну роботу. Зважаючи на це, 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 диска, з обох боків наплюють електроди, до яких підключають струмомпідводи. Добротність таких резонаторів сягає декількох тисяч [6].

Вважатимемо 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

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

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 у початковий момент вимірювання часового інтервалу;  $A_k$  – амплітуда вільних коливань у кінцевий момент вимірювання часового інтервалу;  $n$  – кількість періодів у інтервалі часу згасання коливань;  $T$  – період вільних коливань;  $Z$  – відношення амплітуди вільних коливань у початковий момент вимірювання до амплітуди вільних коливань у кінцевий момент вимірювання

Добротність системи [7] зв'язана із частотою вільних коливань  $\omega_b$  та коефіцієнтом опору співвідношенням

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

де  $\omega_b$  – кругова частота вільних коливань;  $Q$  – добротність.

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

Визначимо відносне зменшення амплітуди у п'єзокерамічному резонаторі за один період з (11). Якщо здійснити 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'єзокерамічні резонатори, загальний коефіцієнт для вказаних  $Q$  та  $w_b$  кожного резонатора дорівнює  $k$ , а загальні втрати амплітуди в обох п'єзорезонаторах становитимуть  $k^2=0,9875$ .

Оцінимо, які втрати енергії (коефіцієнт опору) може спричиняти сам акустичний резонатор. Якщо площа приймача акустичної енергії буде меншою від площі джерела, то тільки частина акустичної енергії потраплятиме до приймача, а решта – 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 із круглої масивної заготовки, в середині якої має бути отвір з діаметром, що дорівнює 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 під час проходження 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 становитимуть  $k_{заг}=k^3=0,981$ . Визначимо загальну добротність акустичного резонатора.

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

Після математичних перетворень із (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  $w_{акуст} = 2p \cdot f_{акуст}$ , а

$$T_{акуст} = \frac{1}{f_{акуст}}, \quad \text{за формулами (12) та (15), визначимо}$$

добротність акустичного резонатора

$$Q_{акуст} = \frac{w_{акуст}}{2 \cdot B_{заг}} = \frac{p}{\ln \frac{1}{k_{заг}}}. \quad (16)$$

З (16) можна зробити висновок, що добротність акустичного резонатора стала 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 необхідно вважати автогенератор, який

складається із 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 урахуванням цього чинника формула (3) набуде вигляду

$$j_k + j_b + j_u = 2mp, \quad (17)$$

де  $\varphi_u$  – фазовий зсув, утворений шумами.

Оскільки конструкція резонатора розроблена так, щоб мінімізувати втрати у ньому, і його загальний коефіцієнт передачі як елемента зворотного зв'язку близький до 1 ( $k_{заз.} = 0,981$ ), то для забезпечення амплітудної умови збудження не потрібен великий коефіцієнт підсилення.

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

У підсилювачі корисний сигнал виникає у результаті генерації, а шуми взаємовпливають. Детермінований корисний сигнал [8], [9] підсумовується із шумами малої інтенсивності, що спричиняє випадкове зміщення фази вихідного сигналу. Нехай детермінований сигнал на виході має максимальну амплітуду  $U_{\delta}=10$  В. Його середньоквадратичне значення дорівнюватиме  $U_{c.кв\delta}=0,707U_{\delta}=7,07$  В. Визначимо, яке граничне фазове зміщення може спричинити напруга шумів, якщо до неї додається детермінований сигнал. Напругу шумів можна розглядати як випадковий процес, однією з характеристик якого є середньоквадратичне значення. Значення фази шумів може бути довільним щодо фази детермінованого сигналу. Коли фази збігаються, це не впливатиме на результуючу фазу вихідного сигналу. Максимальне зміщення можливе тоді, коли фаза шуму зміщена стосовно фази детермінованого сигналу на  $\pi/2$ .

Знаючи середньоквадратичне значення напруги шумів та значення детермінованого сигналу, знайдемо можливе граничне зміщення фази вихідного сигналу. Для цього скористаємося правилом трьох сигм. За нормального розподілу напруги шумів та їх середньоквадратичного значення  $\sigma_{U_{ш}}=10$  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

$$\Delta j = \arctg \frac{3\sigma_{U_{ш}}}{U_{\delta}}. \quad (18)$$

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

Відомо, що під час резонансу амплітуда коливань зростає до максимального значення, а значення фазового зсуву між частотою збуджувальної сили та частотою резонатора змінюється на  $\pi$ . Для вищої добротності резонатора цей перехід стрімкіший (рис. 2).

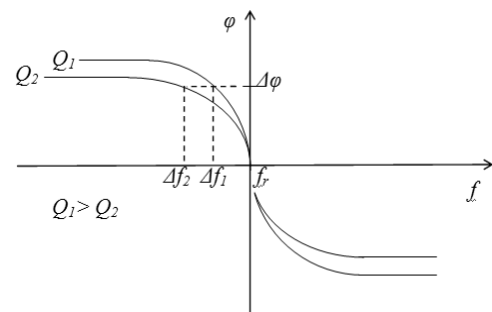


Рис. 2. Фазочастотна характеристика коливального контуру

Fig. 2. Phase-frequency characteristic of oscillatory circuit

Фазочастотна характеристика [3] акустичного резонатора апроксимується виразом

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

де  $f_r$  – резонансна частота;  $f$  – частота збудження;  $B$  – коефіцієнт опору.

Рівняння (19) описує фазочастотну характеристику механічної коливної системи. У такій системі під час переходу частоти збудження через значення резонансної частоти значення фазового зсуву між цими частотами змінюється з 0 на  $-\frac{\pi}{2}$ .

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

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

Графік цієї характеристики зображено на рис. 3.

Якщо відомі максимальні відхилення фази, спричинені шумами й обчислені 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, можливе за різних їх значень. Тому для визначення частотного відхилення (див. рис. 2 та 3) від резонансної частоти, спричиненого шумами, скористаємося графічним методом.

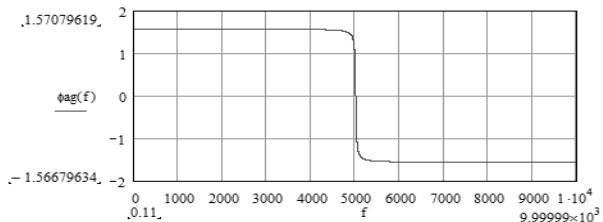


Рис. 3. Фазочастотна характеристика акустичного резонатора

Fig. 3. Phase-frequency characteristic of acoustic resonator

Відхилення частоти визначено 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 міститься приблизно посередині між цими значеннями  $f_{\text{сеп}}=5$  кГц.

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

Таблиця 3

**Вплив шумів на значення концентрації газу**

Частота, кГц	Концентрація N <sub>2</sub> , %	Концентрація O <sub>2</sub> , %	Концентрація H <sub>2</sub> , %
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 табл. 3 максимальне відхилення концентрації азоту дорівнює 0,04 % для його відносної концентрації 6,44 %, що відповідає відносній похибці вимірювання концентрації азоту 0,9 %.

**Висновки:**

- Запропоновано метод, який дає змогу оперативно, з прийнятною точністю, визначати відносні концентрації складових дво- і трикомпонентних сумішей газів. В основу цього методу покладено 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.

- Запропонований метод не передбачає використання порівняльної кювети, тому не потрібен 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 в комп'ютері.

**Список літератури**

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

**References**

1. Gas analyzers / Pavlenko V. A. – Moscow - Leningrad: Mechanical Engineering, 1965. – 296 p.
2. Differential detectors for gas chromatography / V. V. Brazhnikov. – Moscow: Nauka, 1974. – 223 p.
3. Application of ultrasonic sensors / Lutsik I., Buniak L., Stadnik B. – Lviv: Joint-stock company "BaK", 1998. – 232 p.
4. Radio circuits and signals. Textbook / Baskakov S. I. – Moscow: Higher school, 1988 – 448 p.
5. Mathcad 14 / Kiryanov D. V. – St. Petersburg: "BHV-Petersburg, 2007. – 704 p.
6. Piezo-resonance sensors / Malov V. V. – Moscow: Energoatomizdat, 1989. – 272 p.
7. The course of theoretical mechanics. Textbook / Nikitin N. N. – Moscow: Higher school, 1990. – 607 pp.
8. Analogue electronics on operational amplifiers / A. J. Peyton, V. Volsh. – Moscow: Bean, 1994. – 352 p.
9. Working out the results of measurements; Teaching Manual / M. Dorozovets. – Lviv: Publishing House of the National University "Lviv Polytechnic", 2007. – 624 s.
10. Decrease of the errors of the generator of the semiconductor resonance sensor / Rak V. S., Baisar R. I. Sensors and systems. – Moscow, 2007. – № 6. – From 10–13.