

Tadeusz UTHKE

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki

ELEKTROAKUSTYCZNY PRZETWORNIK DO POMIARU SKŁADU OBJĘTOŚCIOWEGO POWIETRZA

Streszczenie. Przedmiotem pracy jest rozwinięcie akustycznej metody rezonansowej pomiaru składu objętościowego mieszanin gazowych. Kryterium pomiarowym metody jest prędkość dźwięku w mieszaninie gazowej jako parametr, który przy danych prędkościach dźwięku w gazach składowych jest funkcją składu objętościowego mieszaniny.

Zagadnienie analizy ilościowej mieszanin gazowych występuje w wielu procesach technologicznych i produkcyjnych. Stosowane w tym celu klasyczne metody pomiarowe są dość uciążliwe, pracochłonne i wymagają stosowania kosztownych aparatów. W praktyce często zachodzi konieczność przeprowadzenia analizy ilościowej mieszaniny dwóch znanych gazów mierząc parametry wypadkowe mieszaniny. Pomiarzy tego typu są uzasadnione ogólnymi tendencjami do instrumentalizacji i automatyzacji technicznych metod pomiarowych.

Bardzo wygodną, zwłaszcza w przypadku ciągłej kontroli mieszaniny gazowej o szybko zmieniającym się składzie, przepływającej ze zmienną prędkością, okazała się metoda, oparta na pomiarze parametrów akustycznych mieszaniny. Parametrem takim, dogodnym z punktu widzenia techniki pomiarowej, jest prędkość dźwięku, jako wielkość fizyczna, którą można mierzyć dokładnie za pomocą stosunkowo prostych metod pomiarowych.

Tablica 1

Metody fizyczne analizy gazowej

Lp.	Rodzaj analizy	Parametr rozróżniany
1	Wagowa	masa
2	Objętościowa	objętość
3	Temperaturowa	ciepło właściwe
4	Konduktometryczna cieplna	przewodność cieplna
5	Soniczna i ultrasoniczna	prędkość lub absorpcja dźwięku
6	Magnetometryczna	przenikalność magnetyczna

cd. tablicy 1

Lp.	Rodzaj analizy	Parametr rozróżniany
7	Elektrostatyczna	przenikalność elektryczna
8	Optyczna absorpcyjna	absorpcja promieni świetlnych
9	Refraktometryczna	gęstość optyczna
10	Radiometryczna	gęstość

Tablica 2

Metody fizykochemiczne analizy gazowej

Lp.	Rodzaj analizy	Parametr rozróżniany
1	Miareczkowa	aktywność chemiczna i masa
2	Katalityczna	ciepło reakcji chemicznej
3	Spektrofotometryczna czynna (z pobudzeniem przez podgrzewanie)	budowa atomowa, proporcje ilościowe

W tablicy 1 i 2 wyszczególniono wszystkie dotychczas poznane metody analizy fizycznej i fizykochemicznej mieszanin gazowych.

W metodzie rezonansowej analiza mieszanin sprowadza się do pomiaru wypadkowej prędkości dźwięku, oczywiście tylko w tym przypadku, gdy prędkości dźwięku w gazach składnikowych różnią się od siebie w dostatecznie dużym stopniu.

Tablica 3

Parametry akustyczne częściej spotykanych gazów

Lp.	Ośrodek	Prędkość dźwięku m/s	Względna prędkość dźwięku C_p/C_d	Najmniejsza ilość wykrywalna domieszki - %
1	Para eteru	179,2	1,850	0,17
2	Dwusiarczek węgla	189,0	1,752	0,19
3	Chlor	205,3	1,615	0,25
4	Para alkoholu etyl.	230,6	1,437	0,39
5	Dwutlenek węgla	258,0	1,283	0,60
6	Tlen	317,2	1,045	4,50
7	Powietrze suche	331,45	1,000	-
8	Azot	337,0	0,984	11,0
9	Tlenek węgla	337,1	0,984	11,0
10	Para wodna	401,0	0,826	1,3
11	Metan	432,0	0,767	1,0
12	Gaz świetlny	490,4	0,677	0,7
13	Wodór	1269,5	0,261	0,43

W tablicy 3 uszeregowano gazy według prędkości dźwięku. Obliczono również względną prędkość dźwięku w stosunku do prędkości dźwięku w powietrzu.

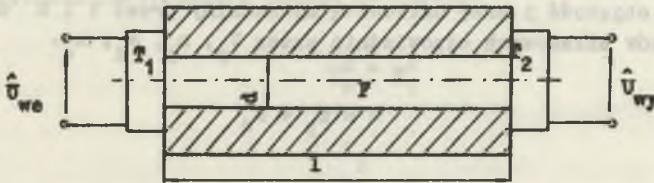
Ze wszystkich znanych metod wyznaczania względnych zmian prędkości dźwięku, wywołanych w omawianym przypadku zmianami składu objętościowego mieszaniny dwóch gazów, najbardziej dokładne są metody rezonansowe, oparte na zależności

$$c = \lambda f \quad (1)$$

gdzie:

- c - prędkość dźwięku w ośrodku,
- λ - długość fali dźwiękowej,
- f - częstotliwość drgań akustycznych.

Zakładając stałość jednego z parametrów można traktować względną zmianę drugiego parametru jako pośrednią zmianę prędkości dźwięku, zależnej od chwilowego składu objętościowego badanej mieszaniny, oczywiście przy zachowaniu stałych parametrów fizycznych pomiaru, a przede wszystkim temperatury. Najbardziej dogodnym, rezonansowym układem akustycznym służącym do wyznaczania zależności (1) okazał się falowód akustyczny w stanie obustronnego zamknięcia. Falowodem takim jest odcinek rury metalowej o długości co najmniej 5 razy większej od średnicy. Drgania rezonansowe "półfalowe" uzyskuje się za pomocą przetworników elektroakustycznych zamocowanych po obu stronach falowodu (rys. 1).



Rys. 1. Rezonator falowodowy

F - wnęka falowodu, T_1 - przetwornik nadawczy, T_2 - przetwornik odbiorczy

Układ tego typu zachowuje się jak czwórnik elektryczny, którego tłumienie jest najmniejsze, gdy częstotliwość f napięcia pobudzającego U_{we} spowoduje ułożenie się wewnątrz falowodu połówki fali stojącej z węzłami drgań po obu jego końcach.

Zwiększenie ciśnienia akustycznego spowoduje powiększenie napięcia wyjściowego U_{wy} .

Uproszczona teoria akustycznej metody rezonansowej

Kryterium pomiarowym metody jest wypadkowa prędkość dźwięku c_w , będąca funkcją prędkości dźwięku w gazach składowych c_p (w powietrzu) i c_d (w gazie stanowiącym badaną domieszkę do powietrza) oraz ich proporcji objętościowych. Dla fali płaskiej w gazach obowiązuje zależność:

$$c_w^2 = \frac{P \mathcal{K}}{\rho}, \quad (2)$$

gdzie:

P - ciśnienie statyczne,

\mathcal{K} - stosunek ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu, do ciepła właściwego przy stałej objętości,

ρ - gęstość gazu.

Odpowiednie prędkości dźwięku w gazach składowych związane są zależnościami:

$$c_p^2 = \frac{P_p \mathcal{K}_p}{\rho_p} \quad \text{oraz} \quad c_d^2 = \frac{P_d \mathcal{K}_d}{\rho_d} \quad (3a, b)$$

Pomiar przeprowadza się przy stałym ciśnieniu $P_p = P_d = P$ oraz przy założeniu $\mathcal{K}_p = \mathcal{K}_d = \mathcal{K}$, na co pozwala niewielka zmienność współczynnika.

W tych warunkach prędkość dźwięku będzie wyłącznie funkcją gęstości wypadkowej mieszaniny, czyli

$$\rho = \frac{P \mathcal{K}}{c_w^2}, \quad \rho_p = \frac{P \mathcal{K}}{c_p^2}, \quad \rho_d = \frac{P \mathcal{K}}{c_d^2}, \quad (4a, b, c)$$

Oznaczamy objętość i masę całkowitą mieszaniny przez V i M oraz objętość i masy gazów składowych odpowiednio przez V_p , m_p , V_d , m_d .

Wówczas

$$m = m_p + m_d \quad (5)$$

oraz

$$V \rho = V_p \rho_p + V_d \rho_d,$$

gdzie w miejsce poszczególnych gęstości można wstawić wyrażenia (5a, b, c):

$$V \cdot \frac{P \mathcal{K}}{c_w^2} = V_p \cdot \frac{P \mathcal{K}}{c_p^2} + V_d \cdot \frac{P \mathcal{K}}{c_d^2},$$

Po podzieleniu stronami przez P^2 otrzymuje się:

$$\frac{V}{c^2} = \frac{V_p}{c_p^2} + \frac{V_d}{c_d^2} \quad (6)$$

Podstawiając $V_p = V - V_d$ otrzymuje się względną zawartość objętościową domieszki

$$\frac{V_d}{V} = \frac{\frac{1}{c_w^2} - \frac{1}{c_p^2}}{\frac{1}{c_d^2} - \frac{1}{c_p^2}}$$

oraz

$$\alpha = \frac{\left(\frac{c_p}{c_w}\right)^2 - 1}{\left(\frac{c_p}{c_d}\right)^2 - 1} \quad (7)$$

gdzie

$$\alpha = \frac{V_d}{V}$$

Wzór (7) może być bezpośrednio użyty do obliczenia zawartości domieszki do powietrza, jeżeli korzystając ze wzoru (1) zastąpimy stosunek prędkości dźwięku c_p/c_w odpowiednim stosunkiem częstotliwości rezonansowych falowodu akustycznego, napełnionego kolejno czystym powietrzem, a następnie powietrzem zawierającym badaną domieszkę:

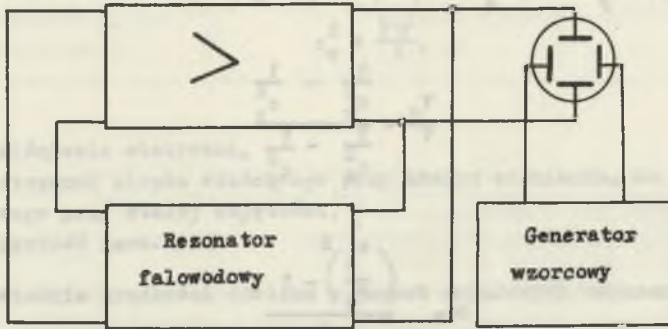
$$\frac{c_p}{c_w} = \frac{f_p}{f_w}$$

wówczas

$$\alpha = \frac{\frac{f_p}{f_w} - 1}{\frac{c_p}{c_d} - 1} \quad (8)$$

Jest to ostateczne wyrażenie umożliwiające w prosty sposób obliczenie wartości domieszki w powietrzu (lub w innym gazie odniesienia). Stosunek c_p/c_d występujący w mianowniku otrzymanego wyrażenia jest wielkością stałą, którą można obliczyć dla konkretnej pary gazów analizowanej mieszaniny. Wielkość ta została podana dla powietrza w odniesieniu do domieszek innych gazów w tablicy parametrów.

Częstotliwość rezonansową falowodu akustycznego można mierzyć w sposób ciągły po włączeniu go w pętlę sprzężenia zwrotnego wzmacniacza elektronicznego za pośrednictwem dwóch przetworników elektroakustycznych (rys. 1 i 2).



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiaru częstotliwości generacji

Powstające drgania elektryczne można mierzyć za pomocą częstotlicmiernicy, a w warunkach laboratoryjnych metodami porównawczymi. Spodziewaną częstotliwość generacji można obliczyć w sposób przybliżony po przekształceniu wzoru (1) do postaci

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l} \quad (9)$$

gdzie można przyjąć dla powietrza o temperaturze 18°C przybliżoną wartość $c = 340$ m/s, a l - jest długością czynną rezonatora.

Warunki elektroakustyczne wytwarzania drgań

Z teorii falowodu bezstratnego o długości l i oporności akustycznej charakterystycznej

$$Z_f = \frac{\rho_0 c}{S} \quad (10)$$

(gdzie S - przekrój rury), zamkniętego opornością akustyczną Z_k , wynika wyrażenie na oporność wejściową falowodu:

$$Z_p = Z_f \frac{Z_k + jZ_f \operatorname{tg} \beta l}{Z_f + jZ_k \operatorname{tg} \beta l} \quad (11)$$

Dla falowodu o długości $l = \frac{\lambda}{2}$

$$\operatorname{tg} \beta l = \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{2} = 0$$

i wówczas

$$\underline{Z}_p = \underline{Z}_k \quad (12)$$

Oporność wejściowa falowodu równa się jego oporności obciążenia. Falowód bezstratny o długości $\lambda/2$ jest więc transformatorem akustycznym o przekładni 1:1. Tłumienie wprowadzone do obwodu przez utworzony czwórnik elektryczno-akustyczno-elektryczny będzie więc wyłącznie funkcją skuteczności przetworników.

Poniżej przedstawiono obliczenie tłumienia dla następujących założeń:

1) przetworniki są identyczne, odwracalne, posiadające cechy czwórników nieprzezroczystych, o oporności strony akustycznej \underline{Z}_{ak} i strony elektrycznej \underline{Z}_e , o skuteczności odbiorczej w stanie otwarcia zacisków elektrycznych \underline{S} ;

2) obowiązuje teoria wzajemności przyjmująca równość odpowiednio wyrażonych skuteczności nadawczej i odbiorczej przetworników odwracalnych;

$$\frac{\dot{x}}{\underline{I}_p} = \frac{\underline{E}}{\underline{p}} = \underline{S} \quad (13)$$

gdzie:

\dot{x} - akustyczna prędkość objętościowa wytwarzana przez przetwornik pobudzany od strony elektrycznej prądem \underline{I}_p ,

\underline{I}_p - prąd elektryczny pobudzający przetwornik,

\underline{E} - siła elektromotoryczna na zaciskach przetwornika pobudzanego od strony akustycznej ciśnieniem akustycznym \underline{p} ,

\underline{p} - ciśnienie akustyczne działające na przetwornik,

\underline{S} - skuteczność odbiorcza przetwornika w stanie otwarcia zacisków elektrycznych.

Ze wzoru (12) wynika, że ciśnienie akustyczne \underline{p}_2 działające na membranę przetwornika odbiorczego w czasie rezonansu półfalowego jest równe ciśnieniu \underline{p}_1 wytwarzanemu przez membranę przetwornika nadawczego (rys. 1).

Wniosek ten pozwala na utworzenie pełnego schematu zastępczego falowodu z przetwornikami, w czasie rezonansu (rys. 3), w którym elementy akustyczne zostały zastąpione odpowiadającymi im przez analogię elementami elektrycznymi. Ze schematu otrzymanego czwórnika elektrycznego wynikają następujące zależności:

$$p = -\frac{\dot{x}}{2} Z_{ak}$$

oraz

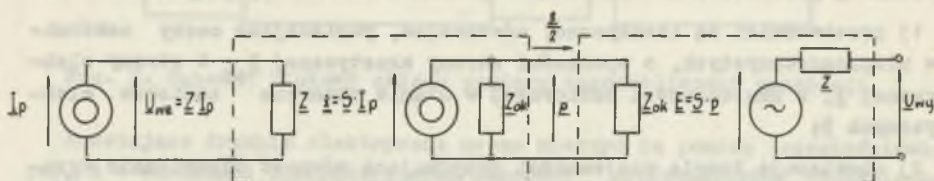
$$\dot{x} = S I_p \quad (14a, b)$$

przeto

$$p = \frac{1}{2} S I_p Z_{ak} \quad (15)$$

i

$$U_{wy} = E = S p = \frac{1}{2} S^2 I_p Z_{ak} \quad (16)$$



Rys. 3. Schemat zastępczy układu dwóch jednakowych przetworników odwracalnych, nieprzezroczystych, sprzężonych bezpośrednio ze sobą po stronie aktycznej

Przechodząc na zasilanie ze źródła napięciowego o napięciu $U_{we} = Z I_p$ otrzymamy ostatecznie:

$$U_{wy} = \frac{1}{2} S^2 \frac{Z_{ak}}{Z} U_{we} \quad (17)$$

oraz

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{1}{2} S^2 \frac{Z_{ak}}{Z} \quad (18)$$

Warunki działania układu wynikające z teorii generacji

Z warunku liniowej teorii generacji dla generatorów z dodatnim sprzężeniem zwrotnym wynikają zależności:

$$m k = 1, \quad (19)$$

$$m k = 1 \quad (20)$$

oraz

$$\varphi_m + \varphi_k = 0, \quad (21)$$

gdzie:

$$\underline{m} = m e^{j\varphi_m} \quad - \text{wartość zespolona współczynnika sprzężenia zwrotnego},$$

$$\underline{k} = k e^{j\varphi_k} \quad - \text{wartość zespolona wzmocnienia napięciowego}.$$

Przesunięcie fazowe w czwórniku sprzężenia zwrotnego składa się w tym przypadku z przesunięcia φ_f we wnęce falowodu oraz z przesunięcia φ_p wniesionego przez przetworniki:

$$\varphi_m = \varphi_f + \varphi_p \quad (22)$$

Można założyć, że wzmacniacz nie przesuwają fazy, co praktycznie jest łatwo zrealizować w zakresie średnich częstotliwości akustycznych, a więc

$$\varphi_k = 0 \quad (23)$$

i warunki generacji przybiorą postać:

$$m \cdot k = 1 \quad (24)$$

oraz

$$\varphi_m = \varphi_f + \varphi_p = 0 \quad (25)$$

Każde zniekształcenie fazy φ_p wprowadzone przez przetworniki musi być skompensowane w falowodowym czwórniku rezonansowym przez jego oddziaływanie fazowe φ_f :

$$\varphi_f = \varphi_p \quad (26)$$

Przesunięcie fazowe wniesione przez obwód rezonansowy można wyrazić wzorem:

$$\varphi_f = \arctg(Q\nu) \quad (27)$$

gdzie:

Q - dobroć obwodu,

$$\nu \approx \frac{2(f - f_r)}{f_r} \quad - \text{odstrojenie względne (wartość przybliżona dla małych odstrojeń)}.$$

W związku z tym

$$v = \frac{-tg \varphi}{Q} \quad (28)$$

Wtrącenie składowej urojonej do obwodu generacyjnego wywiera wpływ na warunek fazy, czyli na częstotliwość.

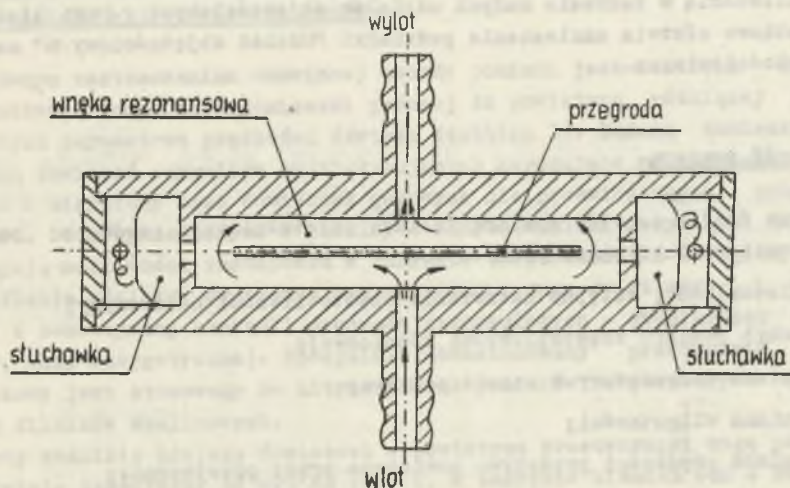
W konkretnym przypadku

$$\underline{m} = \frac{U}{U_{we}} = \frac{1}{2} \lg^2 \cdot \frac{Z_{ak}}{Z} \quad (29)$$

Przyjmując, że \underline{S} jest zawsze rzeczywiste, oraz eliminując wpływ Z na przebiegi (co zawsze można zrealizować, gdy przetworniki będą pracować na bardzo duże oporności elektryczne), stwierdzamy istotny wpływ składowej urojonej oporności akustycznej Z_{ak} przetworników na częstotliwość generacji. Chcąc więc, aby częstotliwość generacji była blisko częstotliwości rezonansowej falowodu, należy stosować przetworniki o czysto stratnościowym charakterze oporności akustycznej oraz falowód o jak największej dobroci Q (co wynika z wzoru (28)).

Konstrukcja przetwornika

Wnęka rezonatora wykonana jest zwykle w postaci grubościennej rury metalowej o przekroju kołowym. Wymiary wnęki uzależniona się w pierwszym rzędzie od właściwości zastosowanych przetworników elektroakustycznych. Są to zazwyczaj miniaturowe słuchawki magnetoelektryczne, stosowane jako wyposażenie dodatkowe odbiorników tranzystorowych lub małe mikrofony dynamiczne. Charakterystyka częstotliwościowa skuteczności użytych przetworników powinna być zupełnie płaska, przynajmniej w zakresie jednej oktawy częstotliwości. Jako podstawową częstotliwość generacji przyjmuje się częstotliwość leżącą w środku wspomnianej, płaskiej części charakterystyki, np. $f_p = 2000$ Hz. Rezonator półfalowy wytwarza drgania o tej częstotliwości przy długości wnęki $l = 86$ mm, w powietrzu suchym o temperaturze 20°C . Średnica wnęki powinna być 5-7 razy mniejsza od długości, w podanym przypadku $d = 17$ mm. W celu uzyskania dobrych właściwości rezonansowych wnęka nie powinna posiadać nierówności i otworów. Dopuszcza się jedynie wykonanie dwóch niewielkich otworów, leżących dokładnie w połowie długości rury do zaopatrywania przetwornika w próbki mieszaniny gazowej. W celu uzyskania dokładnego przepłukiwania wnęki stosuje się podłużną przegrodę. Użytkany w ten sposób przeciwny ruch gazów względem przetworników elektroakustycznych eliminuje wpływ zjawiska Dopplera na częstotliwość drgań. Nie jest pożądane osadzanie się skroplin wody i innych cieczy na membranach przetworników; membrany powinny więc być osłonięte bardzo cienką i elastyczną folią z tworzyw sztucznych. W celu wyeliminowania wpływu ciśnień



Rys. 4. Przekrój podłużny przetwornika elektroakustycznego do analizy mieszanin anestetycznych

statycznych i dynamicznych (spowodowanych przepływającym gazem) na działanie przetworników elektroakustycznych, te ostatnie należy otoczyć szczelnymi komorami, połączonymi jedynie niewielką szczeliną w wnękę rezonatora. Na rys. 4 przedstawiono przykład konstrukcji przetwornika rezonatorowego, stosowanego do pomiaru udziału objętościowego pary eteru w tlenie.

Pomiar bezpośredni udziału objętościowego za pomocą miernika wskazówkowego

Jak wykazuje praktyka pomiarowa, zmiany częstotliwości spowodowane doprowadzeniem domieszki gazowej do powietrza są stosunkowo niewielkie. W celu poprawienia dokładności bezpośredniego odczytu stosuje się metodę heterodynową pomiaru częstotliwości. Generatorem odniesienia - heterodyną - jest zwykle drugi, identyczny przetwornik rezonatorowy wypełniony czystym powietrzem. Sygnał o częstotliwości f_s , generowany przez przetwornik właściwy oraz sygnał heterodyny o częstotliwości f_h doprowadza się do modulatora zrównoważonego. W wyniku modulacji uzyskuje się różnicowy sygnał użyteczny $\Delta f = f_h - f_s$ oraz sumaryczny - niepożądany - $f_h + f_s$. Sygnały wejściowe f_h oraz f_s są przez modulator zrównoważony eliminowane, tłumienie sygnału $f_h + f_s$ uzyskuje się za pomocą filtra dolnoprzepustowego. Mierzony sygnał różnicowy $\Delta f = f_h - f_s$ za pomocą wskazówkowego miernika częstotliwości (np. całkującego) otrzymuje się bezpośredni pomiar udziału

objętościowego wybranej domieszki gazowej. Zależność pomiędzy udziałem a częstotliwością w zakresie małych udziałów objętościowych jest liniowa, co dodatkowo ułatwia naniesienie podziałki "Udział objętościowy %" na skalę częstotliciomierza.

Dokładność pomiaru

Główne źródła uchybów pomiaru udziału objętościowego gazów za pomocą przetworników elektroakustycznych to:

- 1) niedokładne, wstępne ustawienie częstotliwości heterodyny;
- 2) uchyb pomiaru częstotliwości różnicowej;
- 3) zmiana temperatury w czasie pomiaru;
- 4) zmiana wilgotności;
- 5) zmiana prędkości przepływu powietrza przez przetwornik;
- 6) pojawienie się nieprzewidzianego rodzaju gazu.

W celu usunięcia wymienionych przyczyn należy stosować częstsze korekcyjne częstotliwości heterodyny, źródło o stabilizowanym napięciu zasilającym oraz stabilizację pozostałych warunków pomiaru. Prędkość przepływu powietrza powinna być równomierna, niewielka w stosunku do prędkości dźwięku, np. około 1 m/s. Przy zachowaniu tych warunków można uzyskać wyniki pomiarowe z uchybem bezwzględnym, granicznym $\pm 0,1\%$ udziału domieszki, a względnym, granicznym $\pm 3\%$ (w odniesieniu do zakresu pomiarowego). Informują o tym zestawione w tablicy 4 własności użytkowe mierników stosowanych w medycynie.

Tablica 4

Przykładowe dane użytkowe elektroakustycznych analizatorów gazu konstruowanych dla potrzeb medycznych

Lp.	Nazwa miernika	Dziedzina zastosowania	Nazwiska konstruktorów	Zakres pomiaru	Uchyb bezwzględny
1	Analizator zawartości par eteru w powietrzu	Anestezjologia	J.E.Wilson	0 ÷ 23%	$\pm 1\%$
2	Analizator zawartości dwutlenku węgla w powietrzu	Badanie procesów fizjologicznych	F.D.Stott	0 ÷ 10%	$\pm 0,1\%$
3	Analizator zawartości par eteru w powietrzu lub w tlenie	Anestezjologia	J.Kasprowski i T.Uthke	0 ÷ 3% 0 ÷ 15%	$\pm 0,1\%$ $\pm 0,5\%$

Informacje o zakresie stosowania elektroakustycznego przetwornika do pomiaru udziału objętościowego gazów

Głównym zastosowaniem omawianej metody pomiaru jest kontrola udziału procentowego jednolitej domieszki gazowej do powietrza, różniącej się od powietrza parametrem prędkości dźwięku (tablica 3). Badana domieszka nie powinna zawierać czynników oddziałujących korodująco na zastosowane słuchawki i mikrofony oraz domieszek gazowych nie przewidzianych programem pomiaru. Poza wymienionymi w tablicy 4 zastosowaniami medycznymi na uwagę zasługują możliwości zastosowań w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy (określanie udziału dwutlenku węgla, metanu, gazu świetlnego i wodoru oraz o samoczynnej kontroli procesów przemysłowych - dwusiarczek węgla-chlor, gazy energetyczne). Specjalnie skonstruowany przetwornik ultradźwiękowy jest stosowany do ultraszybkich pomiarów temperatury w cylindrach silników spalinowych.

Przy analizie udziału domieszek w powietrzu przetworniki mogą pracować w zakresie temperatur od -20 do $+50$ °C, w zakresie ciśnień 660 ± 860 Tr, w zakresie wilgotności względnej $0 - 80\%$. Zalety przetworników rezonansowych to ich duża czułość, stosunkowo prosta budowa oraz możliwość pracy w zakresie powolnych i szybkich zmian w składzie mieszaniny gazowej. Odpowiednio przekonstruowane przetworniki ultradźwiękowe mogą pracować w zakresie wyższych temperatur i ciśnień. Wyjście układu pomiarowego może być przystosowane do odczytu cyfrowego lub do współpracy z układem przeliczania danych dla potrzeb samoczynnej regulacji składu mieszaniny np. w procesach technologicznych. Podany zakres stosowania przetworników może być rozszerzony w dziedzinę ultradźwięków do badania cieczy.

LITERATURA

- [1] Kacprowski J., Uthke T.: Akustyczna metoda rezonansowa analizy mieszanin gazowych. Rozprawy elektrotechniczne, t. VII, zeszyt 1, 1961.
- [2] Żyszkowski .: Podstawy elektroakustyki. WNT, Warszawa 1966.

Przyjęto do druku w listopadzie 1973 r.

ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОГО СОСТАВА ВОЗДУХА

Р е з ю м е

Целем работы есть развитие акустического метода измерения объемного состава газовых смесей. В качестве измерительного критерия принята скорость звука в газовой смеси, объемный состав которой должен быть определен.

THE ELEKTROACOUSTIC CONVERTER FOR THE MEASUREMENT OF THE VOLUMETRIC COMPOSITION OF AIR

S u m m a r y

The subject of this paper is the development of the acoustic method for measuring the volumetric composition of different gaseous mixtures. The described method is based on the measurement of the velocity of sound in the investigated mixture.

No.	Material	Dimensions	Weight	Volume	Density
1	Aluminum	10 x 10 x 10 mm	2.70 g	1.00 cm ³	2.70 g/cm ³
2	Steel	10 x 10 x 10 mm	7.85 g	1.00 cm ³	7.85 g/cm ³
3	Glass	10 x 10 x 10 mm	2.50 g	1.00 cm ³	2.50 g/cm ³