

Prace Naukowe Instytutu Telekomunikacji i Akustyki
Politechniki Wrocławskiej

Seria: Monografie

64

31

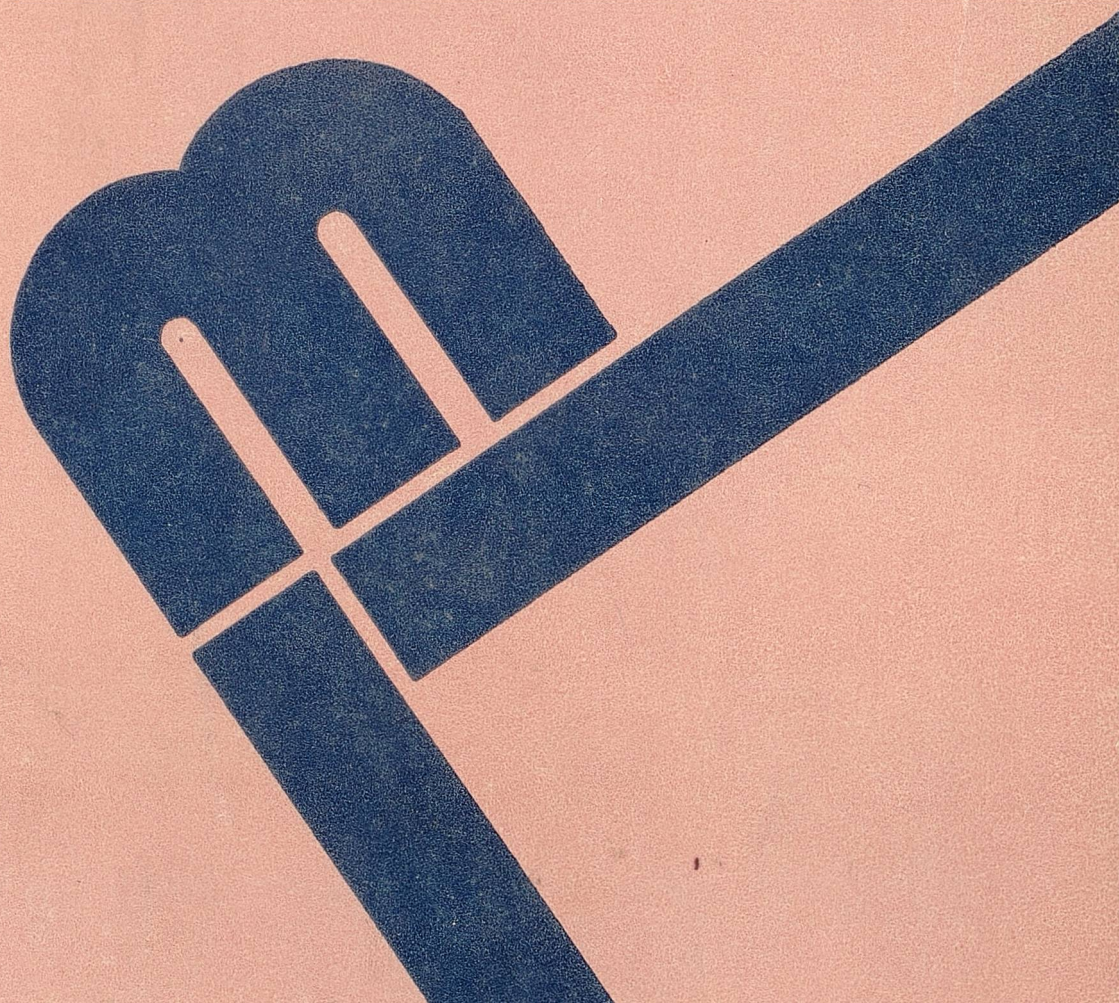
Bolesław Bogusz, Henryk Idczak

Magazyn

Metody pomiaru natężenia akustycznego

A41341

Wrocław 1990



PRACE NAUKOWE POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Scientific Papers of the Institute of Telecommunication
and Acoustics

No. 64 of the Technical University of Wrocław No. 64

Monographs No. 31 1990

Bolesław BOGUSZ, Henryk IDCZAK

Measurement methods of acoustic intensity

Prace Naukowe Instytutu Telekomunikacji i Akustyki
Politechniki Wrocławskiej

64

Seria:
Monografie

31

Bolesław Bogusz, Henryk Idczak

Metody pomiaru natężenia akustycznego



Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej · Wrocław 1990

Recenzenci

Edward HOJAN
Adam LIPOWCZAN

Redaktor naukowy

Włodzimierz WOLSKI

Opracowanie redakcyjne

Maria IZBICKA

Korekta

Aleksandra ŁUKASZEWICZ

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ISSN 0324-9328

Nakład 150+70 egz. Ark. wyd. 5. Ark. druk. $3\frac{3}{4}$. Papier offset kl. III, 70 g, B1.
Oddano do składu w lutym 1990 r. Druk ukończono w listopadzie 1990 r.
Zakład Graficzny Politechniki Wrocławskiej. Zam nr 305/90.

Bolesław BOGUSZ*, Henryk IDCZAK*

METODY POMIARU NATĘŻENIA AKUSTYCZNEGO

Omówiono metody pomiaru natężenia akustycznego, które w ciągu kilku ostatnich lat okazały się nowymi, bardzo obiecującymi narzędziami w pomiarach promieniowania źródeł dźwięku i propagacji fal akustycznych w dowolnym środowisku i warunkach akustycznych. Przedstawiono dane dotyczące wektora natężenia akustycznego, podstawowe metody jego pomiaru oraz główne czynniki ograniczające pomiar natężenia akustycznego metodami dwumikrofonowymi. Omówiono także metody eliminacji lub ograniczenia wpływu tych czynników na błąd pomiaru. Scharakteryzowano podstawowe rozwiązania mierników i sond mikrofonowych do pomiaru natężenia akustycznego czołowych firm światowych, wskazano najważniejsze problemy konstrukcyjne takiej aparatury, problemy kalibracji torów pomiarowych i sondy.

Spis ważniejszych oznaczeń i symboli

a	– przyspieszenie akustyczne
$b[]$	– błąd obciążenia wielkości $[]$
B	– szerokość pasma częstotliwości
c	– prędkość rozchodzenia się fali akustycznej w ośrodku
$E[]$	– wartość oczekiwana (średnia) zmiennej $[]$
f	– częstotliwość
Δf	– przyrost częstotliwości
$G_A(f)$	– widmowa gęstość mocy (jednostronna)

* Instytut Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50–370 Wrocław.

- $G_{AB}(f)$ – wzajemna gęstość widmowa (jednostronna)
 $H(\omega)$ – transmitancja kanału pomiarowego
 I – natężenie akustyczne
 I_r – składowa natężenia akustycznego w kierunku r
 $\text{Im}[\]$ – część urojona liczby $[\]$
 j – $\sqrt{-1}$, jednostka urojona
 J – składowa bierna zespolonego natężenia akustycznego
 k – liczba falowa
 $K(\omega)$ – transmitancja kanału pomiarowego
 $L_{[1]}$ – poziom wielkości $[\]$ w dB
 n – odstęp między próbkami
 N – liczebność próbki
 p – ciśnienie akustyczne
 P_{atm} – ciśnienie atmosferyczne
 $P(f)$ – transformata Fouriera funkcji $p(t)$
 Q – charakterystyka kierunkowości sondy dwumikrofonowej
 r – odległość punktu pomiarowego od źródła
 Δr – odległość między mikrofonami
 $R_{pv}(\tau)$ – funkcja korelacji wzajemnej
 $\text{Re}[\]$ – część rzeczywista liczby $[\]$
 $S_A(f)$ – widmowa gęstość mocy (dwustronna)
 $S_{AB}(f)$ – wzajemna gęstość widmowa (dwustronna)
 t – zmienna czasowa
 T – czas uśredniania, temperatura ośrodka
 v – prędkość akustyczna
 $V(f)$ – transformata Fouriera funkcji $v(t)$
 $W_{AB}(f)$ – transmitancja kalibracji
 $x(t)$,
 $y(t)$ – zmienne zależne od czasu
 $Y(f)$ – transformata Fouriera funkcji $y(t)$
 Z – impedancja falowa
 Z_o – rezystancja właściwa ośrodka
 $|[\]|$ – moduł wielkości $[\]$
 $[\]^{\wedge}$ – estymator wielkości $[\]$
 $\langle [\] \rangle$ – wartość średnia (czasowa) wielkości $[\]$
 α – przesunięcie fazy w torach wejściowych układu pomiarowego
 β – przesunięcie fazy między kanałami ciśnienia i prędkości akustycznej układu pomiarowego
 $\gamma^2_{AB}(f)$ – funkcja koherencji
 δ_{pI} – wskaźnik pI pola akustycznego
 $\delta_{pI,o}$ – zerowy wskaźnik pI przyrządu
 ε – błąd względny

θ	— kąt między kierunkiem propagacji fali akustycznej a kierunkiem orientacji sondy mikrofonowej
ρ	— gęstość ośrodka
σ	— odchylenie standardowe
σ^2	— wariancja
τ	— przesunięcie czasowe
φ	— przesunięcie fazy układu pomiarowego
Φ_p	— faza ciśnienia akustycznego w danym punkcie pola
$\Delta\Phi_p$	— różnica faz między ciśnieniami akustycznymi w dwóch punktach pola
ψ	— zmiana kierunku minimalnej czułości sondy
λ	— długość fali akustycznej
ω	— częstotliwość kątowa (pulsacja)

1. Wprowadzenie

Konwencjonalne metody pomiaru modułu natężenia akustycznego $|\vec{I}|$ oparte są na prostej zależności między natężeniem a wartością średniokwadratową ciśnienia akustycznego $\overline{p^2}$, $|I| = \overline{p^2}/Z_0$, gdzie Z_0 jest rezystancją właściwą środowiska, w którym rozchodzi się fala akustyczna. Zależność ta jest słuszna przy założeniu, że wymiary mikrofonu są dostatecznie małe w stosunku do promienia krzywizny fali akustycznej, oraz że w dużej, względem długości fali akustycznej λ , odległości r od źródła, $r/\lambda \geq 1$, impedancja akustyczna ośrodka dla propagowanej fali jest równa Z_0 . Przy tych założeniach falę akustyczną można traktować jako lokalnie płaską.

Założenia te w istotny sposób ograniczają zakres stosowania metod konwencjonalnych. Nie można np. wykonywać pomiarów tuż przy źródle fali akustycznej w tzw. polu bliskim źródła. Pomiaru takie mogą dostarczyć istotnych informacji o udziale poszczególnych części źródła w całkowitej mocy akustycznej oddawanej przez źródło do środowiska lub też informacji o lokalizacji źródeł dźwięku.

W rzeczywistych warunkach pracy źródeł dźwięku, w założonej, dostatecznie dużej odległości od źródła, konieczna jest ponadto korekcja uwzględniająca wpływ środowiska akustycznego na estymowany parametr akustyczny źródła. Wyznaczenie wpływu środowiska jest zwykle pracochłonne i czasochłonne, a metody pomiarowe służące do wyznaczania liczbowej wartości korekcji są często metodami przybliżonymi.

Z tych powodów najbardziej obiecująca okazała się w ostatnich latach metoda pomiaru wektora natężenia akustycznego oparta na jednoczesnym pomiarze ciśnienia akustycznego i jego gradientu za pomocą dwóch mikrofonów ciśnieniowych. Metoda ta może być stosowana w dowolnym środowisku akustycznym, a więc i w polu bliskim źródła dźwięku i w rzeczywistych warunkach jego pracy (in situ). Stąd jej atrakcyjność i stosunkowo szybki rozwój w ostatnich kilku latach.

Historycznie rzecz ujmując, urządzenie do pomiaru natężenia akustycznego przedstawił po raz pierwszy Olson (w swoim patencie z 1932 roku) [37], który zaproponował zastosowanie mikrofonu wstęgowego (prędkościowego) w połączeniu z mikrofonem ciśnieniowym do pomiaru natężenia akustycznego. W 1941 r. Clapp i Firestone opisali watomierz akustyczny – przyrząd do pomiaru przepływu energii akustycznej zbudowany ze wstęgowego mikrofonu prędkościowego i dwóch kryształicznych mikrofonów ciśnieniowych [16].

W mierniku natężenia akustycznego opisanym przez Bakera w 1955 r. prędkość akustyczna była mierzona za pomocą specjalnej konstrukcji kierunkowego anemometru z podgrzewaną nicią metaliczną [1].

Zasadniczym problemem we wszystkich przytoczonych rozwiązaniach był pomiar prędkości akustycznej. Przetworniki stosowane do tego celu okazały się niepraktyczne w szerszym zastosowaniu, głównie ze względu na trudności ich kalibracji. W 1956 r. Schultz zaproponował wyznaczenie prędkości akustycznej na podstawie pomiaru gradientu ciśnienia akustycznego [44]. Podana przez niego zasada jednoczesnego pomiaru sumy i różnicy ciśnień akustycznych do obliczenia ciśnienia i prędkości akustycznej, stała się podstawą obecnie stosowanych metod pomiaru natężenia akustycznego.

Metody te charakteryzują się dwiema wspólnymi cechami: (i) mierzonym parametrem jest tylko ciśnienie akustyczne, oraz (ii) prędkość akustyczna jest określana na podstawie pomiaru gradientu ciśnienia akustycznego. W ostatnich latach opublikowano wiele prac, których autorzy zajmują się nie tylko problemami praktycznego zastosowania tych metod, lecz również zagadnieniami analizy błędów, metodami ich eliminacji, czynnikami ograniczającymi ich stosowalność a także zagadnieniami opisu teoretycznego pola akustycznego na podstawie natężenia akustycznego. Nie sposób wymienić tutaj wszystkich znaczących prac z tego zakresu, można jedynie wskazać na najbardziej bogate źródło tych prac, jakim są materiały z International Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement. Kongres ten odbywa się od 1981 roku co cztery lata w Senlis we Francji i organizowany jest przez CETIM – Centre Technique des Industries Mécaniques [40], [41]. W kraju od 1986 roku co dwa lata odbywają się Szkoły Naukowe Intensometrii Akustycznej organizowane przez Instytut Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej oraz Polskie Towarzystwo Akustyczne.

W niniejszej pracy przedstawiono w sposób ogólny a jednocześnie możliwie zwięzły podstawowe fakty teoretyczne dotyczące zarówno opisu formalnego natężenia akustycznego, metod jego pomiaru jak i głównych czynników wpływających na błąd estymacji natężenia akustycznego jako wielkości pomiarowej. Rozważono błędy wynikające z przyjętej aproksymacji gradientu ciśnienia akustycznego skończoną różnicą ciśnień mierzonych w dwóch punktach pola, czyli błędy metody a także błędy układu pomiarowego, tj. torów pomiarowych i sondy pomiarowej. Rozważono również procedury korekcji lub eliminacji niektórych z tych błędów, metody kalibracji układów do pomiaru natężenia akustycznego oraz podstawowe roz-

wiązania przyrządów i systemów do pomiaru natężenia akustycznego. Przedyskutowano najważniejsze problemy związane z ich konstrukcją oraz konstrukcją sond dwumikrofonowych. Jako szczególny przykład omówiono miernik natężenia akustycznego SIM – 11, całkowicie oryginalny, który został opracowany i wykonany w Instytucie Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej.

2. Natężenie akustyczne. Zależności podstawowe

Wielkością, która charakteryzuje przepływ energii akustycznej w ośrodku jest natężenie pola akustycznego. W polu akustycznym moc transmitowana przez powierzchnię S jest równa

$$N_a = \iint_S \vec{I} d\vec{S} = \iint_S I_n dS, \quad (2.1)$$

gdzie I_n jest składową normalną wektora natężenia akustycznego.

W ośrodku bez przepływu i przy założeniu, że pole akustyczne jest stacjonarne wektor natężenia definiuje się jako uśredniony w czasie T iloczyn wartości chwilowych ciśnienia $p(t)$ i prędkości akustycznej $\vec{v}(t)$ w tym samym punkcie pola [35], [36]

$$\vec{I} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t) \vec{v}(t) dt. \quad (2.2)$$

Składowa wektora natężenia dla wyróżnionego kierunku w polu akustycznym wynosi

$$I_r = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t) v_r(t) dt = \langle p(t) v_r(t) \rangle \quad (2.2a)$$

gdzie nawiasy trójkątne $\langle \cdot \rangle$ oznaczają uśrednioną po czasie wartość iloczynu ciśnienia i prędkości akustycznej.

Jeżeli pole akustyczne jest sinusoidalne, wygodniej jest stosować notację liczb zespolonych. Zależności (2.2) i (2.2a) można wówczas zapisać w postaci

$$\vec{I} = \frac{1}{2} \text{Re}(p \vec{v}^*), \quad (2.3)$$

$$I_r = \frac{1}{2} \text{Re}(p v_r^*). \quad (2.3a)$$

W ośrodku liniowym bez przepływu słuszne jest równanie Eulera [36], które dla składowej wektora prędkości akustycznej w kierunku r ma postać

$$\rho \frac{\partial v_r(t)}{\partial t} = -\frac{\partial p(t)}{\partial r}, \quad (2.4)$$

gdzie ρ jest gęstością ośrodka.

Z równania (2.4) wynika, że w polu sinusoidalnym składowa ta jest równa

$$v_r = -\frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial r}. \quad (2.5)$$

W dalszej analizie wygodne jest użycie definicji impedancji falowej Z jako stosunku p/v_r w danym punkcie pola akustycznego. W polu sinusoidalnym odwrotność impedancji falowej można na podstawie (2.5) zapisać w postaci

$$\frac{1}{Z} = \frac{v_r}{p} = -\frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \frac{1}{p} = \frac{j}{\omega\rho} \frac{\partial \ln(p/p_0)}{\partial r}, \quad (2.6)$$

gdzie p_0 jest dowolną stałą mającą wymiar ciśnienia akustycznego. Podstawiając

$$p = |p| \exp(j\varphi_p)$$

otrzymujemy

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{\rho\omega} \left(-\frac{\partial \varphi_p}{\partial r} + j \frac{\partial \ln(|p|/p_0)}{\partial r} \right). \quad (2.7)$$

Stąd zespolone natężenie pola akustycznego w kierunku r jest równe

$$I_r = \frac{1}{2} p v_r^* = \frac{1}{2} p \left(\frac{p}{Z} \right)^* = \frac{p_{\text{rms}}^2}{\rho c} \frac{1}{k} \left(-\frac{\partial \varphi_p}{\partial r} - j \frac{\partial \ln(|p|/p_0)}{\partial r} \right), \quad (2.8)$$

gdzie k — liczba falowa, c — prędkość rozchodzenia się fali akustycznej w ośrodku.

Z zależności (2.8) wynikają następujące wnioski:

1. Jeżeli występuje tylko gradient ciśnienia akustycznego $\partial \varphi_p / \partial r$ w kierunku r , to impedancja falowa Z jest rzeczywista, co oznacza, że ciśnienie i prędkość akustyczna są w fazie, a natężenie akustyczne jako składowa czynna zespolonego natężenia akustycznego jest równe

$$I_r = \text{Re}(I_r) = -\frac{p_{\text{rms}}^2}{\rho c} \frac{1}{k} \frac{\partial \varphi_p}{\partial r}. \quad (2.9)$$

Pole takie jest polem czynnym (active sound field). Jak można zauważyć, na podstawie wzoru (2.9), zasadniczą sprawą w metodach pomiaru natężenia pola akustycznego jest wyznaczenie różnicy faz między dwoma punktami pola.

Jako przykład pola czynnego można podać pole fali płaskiej rozchodzącej się w przestrzeni otwartej w kierunku r . Amplituda ciśnienia akustycznego jest stała ($|p| = \text{const.}$) i nie zależy od odległości r , zatem gradient modułu jest równy zero, natomiast faza ciśnienia akustycznego jest równa $\varphi_p = \omega t - kr$, a gradient fazy wynosi $\partial \varphi_p / \partial r = -k$.

Po podstawieniu do wzoru (2.9) otrzymuje się znaną zależność na natężenie akustyczne dla sinusoidalnej bieżącej fali płaskiej

$$I = p_{\text{rms}}^2 / \rho c. \quad (2.10)$$

2. Jeżeli występuje tylko gradient modułu ciśnienia akustycznego $\partial(\ln|p|/p_o)/\partial r$ w kierunku r , wówczas impedancja falowa Z ma tylko składową reaktancyjną, ciśnienie i prędkość akustyczna przesunięte są w fazie o 90° , a natężenie akustyczne jest równe zero, co oznacza, że nie ma przepływu energii akustycznej. Istnieje tylko składowa bierna zespolonego natężenia akustycznego:

$$J_r = \text{Im}(\underline{I}_r) = -\frac{p_{\text{rms}}^2}{\rho c} \frac{1}{k} \frac{\partial \ln(|p|/p_o)}{\partial r}. \quad (2.11)$$

Składowa ta odpowiada energii fluktuującej między źródłem a ośrodkiem. Wartość średnia tej składowej jest równa zero i nie ma udziału w transporcie energii akustycznej, jakkolwiek wpływa na całkowitą gęstość energii pola akustycznego. Pole takie jest polem biernym (reactive sound field). Przykładem pola biernego jest pole fali idealnie stojącej, w którym nie ma transportu energii akustycznej a natężenie akustyczne jest równe zero.

3. Jeżeli nie występuje zarówno gradient fazy jak i modułu ciśnienia akustycznego, to pole jest polem dyfuzyjnym (diffuse sound field). W polu dyfuzyjnym nie występuje ani składowa czynna, ani składowa bierna zespolonego natężenia akustycznego, a cała energia jest „zapamiętana” w polu akustycznym.

Należy zauważyć, że w ogólnym przypadku pole akustyczne składa się z pola czynnego, biernego i dyfuzyjnego.

3. Podstawowe metody pomiaru natężenia akustycznego

3.1. Pomiar natężenia akustycznego na podstawie sumy i różnicy ciśnień akustycznych

Jeżeli rozważymy dwa wszechkierunkowe mikrofony ciśnieniowe A i B umieszczone w polu akustycznym w dostatecznie małej, w stosunku do najkrótszej długości fali akustycznej λ_{min} , odległości Δr , to gradient ciśnienia akustycznego $\partial p(t)/\partial r$ można aproksymować przez różnicę ciśnień podzieloną przez odległość między mikrofonami. Średnią arytmetyczną tych ciśnień można przyjąć za ciśnienie w punkcie znajdującym się w połowie odległości między mikrofonami. Przyjęte aproksymacje

można zapisać następująco:

$$\frac{\partial p(r,t)}{\partial r} \simeq \frac{p_B - p_A}{\Delta r},$$

$$p(r,t) \simeq \frac{1}{2}(p_A + p_B), \quad (3.1)$$

Po podstawieniu zależności (3.1) do równania (2.4) otrzymujemy estymator składowej prędkości akustycznej w kierunku r

$$\hat{v}_r(t) = -\frac{1}{\rho \Delta r} \int_{-\infty}^t [p_B(\tau) - p_A(\tau)] d\tau, \quad \text{dla } \Delta r \ll \lambda_{\min}. \quad (3.2)$$

Stąd na podstawie wzorów (2.2a) i (3.1) estymator natężenia pola akustycznego ma postać

$$\hat{I}_r = \langle p(t) \hat{v}_r(t) \rangle = -\frac{1}{2\rho \Delta r} \langle [p_A(t) + p_B(t)] \int_{-\infty}^t [p_B(\tau) - p_A(\tau)] d\tau \rangle. \quad (3.3)$$

Dla sygnałów stacjonarnych (losowych lub deterministycznych) słuszne są następujące zależności [2]:

$$\langle p(t) \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau \rangle = 0, \quad (3.4)$$

$$\langle p_A(t) \int_{-\infty}^t p_B(\tau) d\tau \rangle = -\langle p_B(t) \int_{-\infty}^t p_A(\tau) d\tau \rangle. \quad (3.5)$$

Zależność (3.3) można zatem zapisać również w postaci

$$\hat{I}_r = -\frac{1}{\rho \Delta r} \langle p_A(t) \int_{-\infty}^t p_B(\tau) d\tau \rangle. \quad (3.6)$$

Zależność (3.3) i (3.6) są podstawowymi zależnościami, na podstawie których można zbudować praktyczne układy do pomiaru natężenia pola akustycznego. Teoretycznie, estymatory (3.3) i (3.6) są identyczne i pozornie wydaje się, że realizacja układu pomiarowego według zależności (3.6) jest prostsza, jednak w praktyce stosuje się układy pomiarowe realizujące zależność (3.3). Wynika to z faktu, że uśrednianie czasowe ciśnienia akustycznego

$$\int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau$$

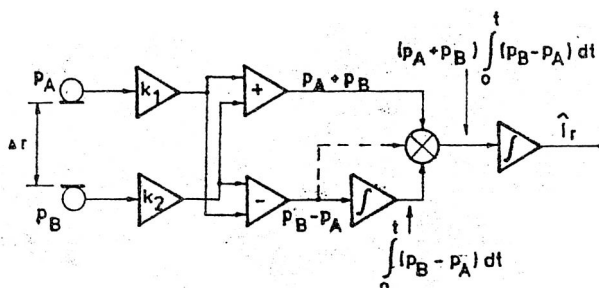
daje na wyjściu układu całkującego sygnał odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości. Jest to szczególnie niedogodne w praktycznej realizacji szerokopasmowych układów pomiarowych. Gradient ciśnienia akustycznego ma odwrotną tendencję. Dla ustalonej odległości między mikrofonami, sygnał odpowiadający różnicy ciśnień akustycznych wzrasta ze wzrostem częstotliwości (liczby falowej k), co w przybliżeniu

kompensuje efekt uśredniania czasowego. Stąd konieczne wzmocnienie sygnału różnicy ciśnień w układzie pomiarowym może pozostać stałe w funkcji częstotliwości.

Większość układów do pomiaru natężenia pola akustycznego opisana w literaturze oparta jest więc na zależności (3.3). Na rys 3.1 pokazano schemat układu pomiarowego realizującego zależność (3.3). Układ ten może służyć również do pomiaru składowej biernej zespolonego natężenia akustycznego przez bezpośrednie pomnożenie sygnałów sumy i różnicy ciśnień akustycznych z pominięciem układu całkującego różnicę ciśnień (na rys. 3.1 zaznaczono to linią przerywaną). Procedura ta wynika ze wzoru, który można wyprowadzić z definicji zespolonego natężenia akustycznego (2.3) i zależności między prędkością akustyczną i przyspieszeniem dla przebiegów harmoniczych $\underline{a} = j\omega \underline{v}$. Wzór ten ma postać [5]

$$\underline{I} = \text{Re}(\underline{I}) + j\text{Im}(\underline{I}) = \langle pv \rangle + j\langle pa \rangle / \omega, \quad (3.7)$$

gdzie przyspieszenie a jako pochodną prędkości akustycznej po czasie można na podstawie wzorów (2.4) i (3.3) aproksymować różnicą ciśnień akustycznych, a dzielenie przez ω może być realizowane przez całkowanie wartości średniej iloczynu sumy i różnicy ciśnień akustycznych w dwóch punktach pola akustycznego.



Rys. 3.1. Schemat blokowy układu do pomiaru natężenia akustycznego wg zależności (3.3) i (3.7)

Fig. 3.1. Block diagram for measurement of sound intensity acc. to eq. (3.3) and (3.7)

3.2. Pomiar natężenia akustycznego na podstawie widma wzajemnego sygnałów z dwóch mikrofonów

Dla przebiegów stacjonarnych natężenie akustyczne zdefiniowane wzorem (2.2) lub (2.2a) można wyrazić również funkcją korelacji wzajemnej R_{pv} między przebiegami ciśnienia i prędkości akustycznej w punkcie r

$$R_{pv}(r, \tau) = \langle p(r, t) v(r, t + \tau) \rangle, \quad \text{dla dowolnego } \tau, \quad (3.8)$$

stąd dla $\tau = 0$, $I_r = R_{pv}(r, 0)$.

Funkcja $R_{pv}(r, \tau)$ związana jest ze wzajemną gęstością widmową $S_{pv}(r, f)$ sygnałów $p(r, t)$ i $v(r, t)$ odwrotną transformatą Fouriera [2]

$$R_{pv}(r, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{pv}(r, f) \exp(j\omega\tau) df, \quad (3.9)$$

przy czym dwustronna wzajemna gęstość widmowa S_{pv} jest funkcją zespoloną argumentu f .

Można wykazać, że $\text{Re}[S_{pv}(r, f)]$ jest rzeczywistą funkcją parzystą argumentu f , a $\text{Im}[S_{pv}(r, f)]$ jest rzeczywistą funkcją nieparzystą argumentu f , zatem słuszna jest zależność [2]

$$I_r = R_{pv}(r, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{Re}[S_{pv}(r, f)] df \quad (3.10)$$

co oznacza, że natężenie akustyczne może być wyznaczone na podstawie części rzeczywistej wzajemnej gęstości widmowej $S_{pv}(r, f)$.

Jeżeli przez $P(f)$ i $V(f)$ oznaczymy transformaty Fouriera odpowiednio sygnałów ciśnienia akustycznego $p(t)$ i prędkości akustycznej $v(t)$ w danym punkcie pola, to po zastosowaniu aproksymacji określonych wzorem (3.1) można zapisać, że

$$P(f) = \frac{1}{2}[P_A(f) + P_B(f)], \quad (3.11)$$

oraz

$$V(f) = -\frac{1}{j\omega\rho\Delta r}[P_B(f) - P_A(f)]. \quad (3.12)$$

Z definicji wzajemnej gęstości widmowej [2]

$$S_{pv} = E[P^*(f)V(f)], \quad (3.13)$$

gdzie $E[\cdot]$ oznacza wartość oczekiwaną zmiennej $[\cdot]$, wynika, że słuszna jest równość

$$S_{pv}^* = S_{vp} = E[P(f)V^*(f)]. \quad (3.13a)$$

Po podstawieniu zależności (3.11) i (3.12) do powyższego równania otrzymujemy

$$\begin{aligned} S_{pv}^* &= -\frac{1}{2\omega\rho\Delta r} jE[[P_A(f) + P_B(f)][P_B^*(f) - P_A^*(f)]] = \\ &= -\frac{1}{2\omega\rho\Delta r} [j(S_{BB} - S_{AA}) - j(S_{AB} - S_{BA})]. \end{aligned}$$

Wykorzystując zależność (3.13a) możemy napisać, że

$$-j(S_{AB} - S_{BA}) = -j(S_{AB} - S_{AB}^*) = 2\text{Im}[S_{AB}],$$

zatem

$$S_{pv}^* = -\frac{1}{2\omega\rho\Delta r} [j(S_{BB} - S_{AA}) + 2\text{Im}[S_{AB}]]. \quad (3.14)$$

Uwzględniając tylko część rzeczywistą ostatniego równania, na podstawie wzoru (3.10) możemy napisać końcową postać estymatora składowej natężenia akustycznego w kierunku r [26]

$$\hat{I}_r = - \int_0^{\infty} \frac{\text{Im}[G_{AB}]}{\omega \rho \Delta r} df \quad (3.15)$$

gdzie G_{AB} oznacza jednostronną (dla przedziału częstotliwości $0, \infty$) wzajemną gęstość widmową sygnałów z dwóch mikrofonów A i B . Do obliczeń numerycznych wzór (3.15) można zapisać w postaci [26]

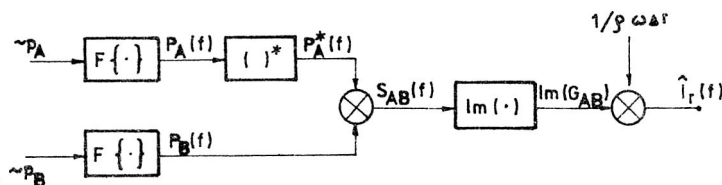
$$\hat{I}_r = - \frac{1}{2\pi \rho \Delta r} \sum_{n=1}^{N/2} \frac{\text{Im}[G_{AB}(n\Delta f)]}{n\Delta f}, \quad (3.16)$$

gdzie sumowanie przebiega od najmniejszej częstotliwości $\Delta f = 1/T$ do częstotliwości Nyquista $\Delta f(N/2)$.

Część urojona wyrażenia (3.14) jest estymatorem składowej biernej natężenia akustycznego w kierunku r

$$\hat{J}_r(f) = - \frac{1}{\omega \rho \Delta r} (S_{BB} - S_{AA}) = \frac{1}{2\omega \rho \Delta r} (G_{AA} - G_{BB}), \quad (3.17)$$

którą można wyznaczyć na podstawie różnicy widm sygnałów A i B . Na rysunku 3.2 przedstawiono schemat blokowy układu do wyznaczania natężenia akustycznego według wzoru (3.15).



Rys. 3.2. Schemat blokowy układu do pomiaru natężenia akustycznego wg zależności (3.15)

Fig. 3.2. Block diagram for measurement of sound intensity acc. to eq. (3.15)

4. Błędy estymacji natężenia pola akustycznego metodą dwumikrofonową

Zastosowanie dwóch mikrofonów ciśnieniowych do jednoczesnego pomiaru ciśnienia akustycznego i jego gradientu w metodach pomiaru natężenia akustycznego opisanych w rozdziałach 3.1 i 3.2 kryje w sobie wiele ograniczeń, które wpływają na dokładność estymacji natężenia pola akustycznego. Ograniczenia te są

źródłem określonych błędów pomiarowych, które można podzielić na dwie zasadnicze grupy [5], [6]:

1. Błędy wynikające z przyjętej aproksymacji gradientu ciśnienia akustycznego skończoną różnicą ciśnień akustycznych mierzonych w dwóch punktach pola akustycznego, czyli błędy metody.

2. Błędy spowodowane różnicą charakterystyk amplitudowych i fazowych torów pomiarowych i układów mikrofonów (sondy mikrofonowej).

Jeżeli natężenie akustyczne potraktuje się jako sygnał losowy, dogodnie jest wyróżnić w całkowitym błędzie estymacji część losową błędu i część systematyczną.

Własności sygnału losowego nie mogą być dokładnie określone na podstawie skończonego zbioru obserwacji (próbek sygnału). Możliwe jest tylko oszacowanie danego parametru sygnału losowego na podstawie próbek sygnału danych w postaci funkcji czasu o długości trwania T . Estymację prowadzi się zwykle przy założeniu, że sygnały są wycinkami realizacji ciągłych i stacjonarnych (ergodycznych) procesów losowych. Parametry otrzymywane na podstawie wartości próbek mają więc charakter statystyczny. Dokładność estymacji tych parametrów może być opisana za pomocą błędu średniokwadratowego określonego wyrażeniem

$$E[(\hat{\phi} - \phi)^2], \quad (4.1)$$

gdzie $\hat{\phi}$ jest estymatorem parametru ϕ (np. natężenia akustycznego).

Po rozwinięciu wyrażenia (4.1) otrzymuje się sumę dwóch wyrażeń. Pierwsze jest wariancją opisującą losową część błędu (random error) równą

$$\sigma^2[\hat{\phi}] = E[\hat{\phi}^2] - E^2[\hat{\phi}], \quad (4.2)$$

drugie natomiast jest kwadratem błędu obciążenia estymatora (bias error) i opisuje systematyczną część błędu równą

$$b^2[\hat{\phi}] = E[(E[\hat{\phi}] - \phi)^2]. \quad (4.3)$$

Błąd średniokwadratowy jest zatem równy

$$E[(\hat{\phi} - \phi)^2] = \sigma^2[\hat{\phi}] + b^2[\hat{\phi}]. \quad (4.4)$$

W praktyce stosuje się dogodny sposób określania błędów estymacji jako błędów względnych (znormowanych), które otrzymuje się przez wzięcie dodatniego pierwiastka kwadratowego z wyrażeń reprezentujących błędy w równaniach (4.2), (4.3) oraz (4.4) i podzieleniu odpowiedniego błędu przez wielkość estymowaną $\phi \neq 0$.

Błędy względne są więc określone następująco [2]:

– względny błąd standardowy

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma[\hat{\phi}]}{\phi} = \frac{1}{\phi} [E[\hat{\phi}^2] - E^2[\hat{\phi}]]^{1/2}. \quad (4.5a)$$

– względny błąd obciążenia estymatora

$$\varepsilon_b = \frac{b[\hat{\phi}]}{\phi} = \frac{E[\hat{\phi}]}{\phi} - 1, \quad (4.5b)$$

– względny błąd skuteczny (rms error)

$$\varepsilon = \frac{1}{\phi} [\sigma^2[\hat{\phi}] + b^2[\hat{\phi}]]^{1/2}. \quad (4.5c)$$

W następnych punktach niniejszego rozdziału wyprowadzono wzory na błędy estymacji natężenia akustycznego. Potraktowano te błędy jako funkcje wielkości opisanych równaniami (4.5a), (4.5b), (4.5c).

4.1. Błąd wynikający ze skończonej odległości między mikrofonami

Jeżeli dwa mikrofony umieszczone są w sinusoidalnym polu akustycznym w odległości Δr , w punktach $(x + \Delta r/2, y, z)$ i $(x - \Delta r/2, y, z)$, to sygnały z tych mikrofonów można zapisać w postaci szeregu Taylora

$$\begin{aligned} p\left(x + \frac{\Delta r}{2}\right) &= p(x) + \frac{\Delta r}{2} p'(x) + \left(\frac{\Delta r}{2}\right)^2 \frac{1}{2} p''(x) + \left(\frac{\Delta r}{2}\right)^3 \frac{1}{6} p'''(x) + \dots \\ p\left(x - \frac{\Delta r}{2}\right) &= p(x) - \frac{\Delta r}{2} p'(x) + \left(\frac{\Delta r}{2}\right)^2 \frac{1}{2} p''(x) - \left(\frac{\Delta r}{2}\right)^3 \frac{1}{6} p'''(x) + \dots \end{aligned} \quad (4.6)$$

przy czym p' oznacza $\partial p(x)/\partial x$.

Dla uproszczenia zapisu można pominąć w dalszej analizie pozostałe współrzędne. Po uwzględnieniu zależności (4.6) w przyjętych aproksymacjach (3.1) można napisać

$$\begin{aligned} p\left(x + \frac{\Delta r}{2}\right) - p\left(x - \frac{\Delta r}{2}\right) &= \Delta r p'(x) + \frac{(\Delta r)^3}{24} p'''(x) + \dots \\ \frac{1}{2} \left(p\left(x + \frac{\Delta r}{2}\right) + p\left(x - \frac{\Delta r}{2}\right) \right) &= p(x) + \frac{(\Delta r)^2}{8} p''(x) + \dots \end{aligned} \quad (4.7)$$

Następnie, korzystając z ogólnej zależności dla przebiegów sinusoidalnych

$$\langle ab \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \{ ab^* \}, \quad (4.8)$$

można estymator natężenia akustycznego, określony wzorem (3.3), wyrazić w na-

stępującej postaci:

$$\begin{aligned} \hat{I}_r(x) &= -\frac{1}{2\rho\Delta r} \operatorname{Re} \left\{ \left[p^*(x) + \frac{(\Delta r)^2}{8} (p''(x))^* + \dots \right] \frac{1}{j\omega} \left[\Delta r p'(x) + \frac{(\Delta r)^3}{24} p'''(x) + \dots \right] \right\} = \\ &= -\frac{1}{2\rho\omega} \operatorname{Im} \left\{ p^*(x) p'(x) + \frac{(\Delta r)^2}{24} p^*(x) p'''(x) + \frac{(\Delta r)^2}{8} p'(x) (p''(x))^* + \dots \right\}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Dokładne wyrażenie na natężenie pola sinusoidalnego jest na podstawie (2.3a) i (2.5) równe

$$I_r(x) = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ p^*(x) v_r(x) \} = -\frac{1}{2\rho\omega} \operatorname{Im} \{ p^*(x) p'(x) \}. \quad (4.10)$$

Po podstawieniu tego wyrażenia do wzoru (4.9) błąd względny obciążenia estymatora natężenia pola akustycznego, wynikający ze skończonej odległości między mikrofonami, jest równy [32]

$$\varepsilon = \frac{\hat{I}_r(x) - I_r(x)}{I_r(x)} \simeq \frac{(\Delta r)^2}{24} \frac{\operatorname{Im} \{ p^*(x) p'''(x) + 3p'(x) (p''(x))^* \}}{\operatorname{Im} \{ p^*(x) p'(x) \}} \quad (4.11)$$

Należy zauważyć, że błąd (4.11), który jest błędem systematycznym, zależy w istotny sposób od struktury pola akustycznego i nie jest możliwe wyznaczenie wartości tego błędu bez szczegółowej znajomości opisu pola.

Jako ilustrację warto rozważyć przykład pola harmonicznej fali płaskiej, rozchodzącej się w kierunku r .

Pomijając czynnik $\exp(j\omega t)$, ciśnienie akustyczne w punktach A i B odległych o Δr można zapisać w postaci

$$\left. \begin{aligned} p_B\left(x + \frac{\Delta r}{2}\right) &= p_0\left(-jk\left(x + \frac{\Delta r}{2}\right)\right) = p(x) \exp\left(-jk \frac{\Delta r}{2}\right), \\ p_A\left(x - \frac{\Delta r}{2}\right) &= p(x) \exp\left(+jk \frac{\Delta r}{2}\right), \\ p(x) &= p_0 \exp(-jkx). \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

Po podstawieniu sumy i różnicy tych ciśnień do wzoru (3.3) oraz wykorzystaniu zależności (4.8), otrzymujemy estymator natężenia równy [26], [32]

$$\begin{aligned} \hat{I}_r(x) &= -\frac{1}{2\rho\Delta r} \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ (p_A + p_B)^* \frac{1}{j\omega} (p_B - p_A) \right\} = \\ &= \frac{|p(x)|^2}{2\rho\omega\Delta r} \sin(k\Delta r) = I_r \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Jeżeli operator $\partial/\partial x$ we wzorze (4.11) zastąpimy współczynnikiem $-jk$, to względny błąd obciążenia natężenia akustycznego dla fali płaskiej możemy wyrazić zależnością

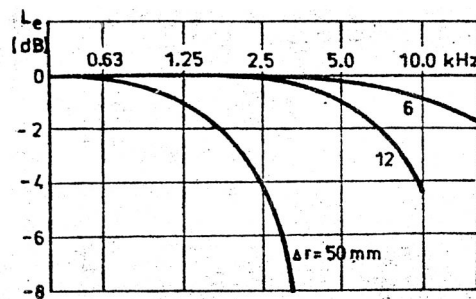
$$\varepsilon \simeq -\frac{1}{6}(k\Delta r)^2. \quad (4.14)$$

Zależność tę można uzyskać przez rozwinięcie we wzorze (4.13) funkcji $\sin x/x$ w szereg potęgowy i uwzględnienie tylko dwóch pierwszych wyrazów tego rozwinięcia (por. [5]).

Na rysunku 4.1 przedstawiono przebieg błędu estymacji wyrażonego w mierze logarytmicznej jako

$$L_e = 10 \lg(\hat{I}_r/I_r) = 10 \lg \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r}, \quad \text{dB} \quad (4.15)$$

w funkcji częstotliwości f i odległości Δr między mikrofonami. Jak można zauważyć, wartość tego błędu rośnie ze wzrostem częstotliwości i odległości Δr , co ogranicza w istotny sposób zakres częstotliwości pomiarowych dla metod dwumikrofonowych.



Rys. 4.1. Błąd estymacji L_e natężenia akustycznego wg wzoru (4.15), w zakresie dużych częstotliwości dla $\Delta r = \text{parametr}$ [26]

Fig. 4.1. Approximation error L_e (acc. to eq. (4.15)) at high frequencies for various distances between the microphones Δr [26]

Jeżeli między kierunkiem propagacji fali akustycznej a kierunkiem r , w którym zorientowana jest para mikrofonów istnieje kąt θ , to odległość między mikrofonami wynosi $\Delta r \cos \theta$ i estymator (4.13) jest równy

$$\hat{I}_\theta = I_r \frac{\sin(k\Delta r \cos \theta)}{k\Delta r} = I_\theta \frac{\sin(k\Delta r \cos \theta)}{k\Delta r \cos \theta}. \quad (4.16)$$

Na przykład dla $\theta = 60^\circ$ górna częstotliwość zakresu pomiarowego wyznaczona ze wzoru (4.16) jest dwukrotnie większa niż dla $\theta = 0^\circ$ dla tej samej wartości błędu określonego według wzoru (4.13). Wzór (4.16) wskazuje jedynie na kierunek zmiany zakresu częstotliwości dla ustalonej odległości Δr , bowiem w praktyce pomiarowej nie ma to istotnego znaczenia.

Tabela 1

Błędy estymacji natężenia pola akustycznego wynikające ze skończonej odległości między mikrofonami dla różnych typów fal akustycznych

Rodzaj zależności	Typ fali akustycznej			
	Fala płaska	Fala kulista zerowego rzędu (źródło monopolowe)	Fala kulista pierwszego rzędu (źródło dipolowe)	Fala kulista drugiego rzędu (źródło quadropolowe)
Względny błąd obciążenia natężenia akustycznego ε wg wzoru (4.11)	$-\frac{1}{6}(k\Delta r)^2$	$\frac{1}{4}\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 - \frac{1}{6}(k\Delta r)^2$	$\frac{7}{12}\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 - \frac{1}{6}(k\Delta r)^2$	$\frac{5}{4}\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 - \frac{1}{6}(k\Delta r)^2$
Składnik błędu zależny od odległości r od źródła fali	—	$\frac{1}{4}\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2$	$\frac{7}{12}\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2$	$\frac{5}{4}\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2$
Minimalna odległość r sondy mikrofonowej od źródła dla $\varepsilon < 1$ dB	—	$r > 1.1\Delta r$	$r > 1.6\Delta r$	$r > 2.3\Delta r$

W tabeli 1 zestawiono, na podstawie pracy [5] i [26], wyniki analizy błędu estymacji określonego wzorem (4.11) dla podstawowych typów fal akustycznych i dla kąta padania fali $\theta = 0^\circ$. Porównując wzory podane w tabeli 1 należy zauważyć, że błędy estymacji natężenia dla fal kulistych zerowego, pierwszego i drugiego rzędu zależą od stosunku odległości Δr między mikrofonami do odległości r sondy mikrofonowej od źródła, co ogranicza zakres stosowania metod dwumikrofonowych w polu bliskim źródła dźwięku.

W praktyce można przyjąć, że w odległości od powierzchni drgającej źródła, trzykrotnie większej od odległości Δr , błąd estymacji natężenia akustycznego dla dowolnego typu fali nie przekracza 1 dB.

4.2. Błąd wynikający z przesunięcia fazy systemu pomiarowego

Z zależności (2.9) wynika, że dla metod pomiaru natężenia akustycznego opartych na technice dwumikrofonowej zasadniczą sprawą jest pomiar gradientu fazy ciśnienia akustycznego w polu akustycznym. Współczynnik $\frac{1}{k}(\partial\varphi_p/\partial r)$ we wzorze (2.9) jest gradientem fazy w kierunku r , unormowanym do gradientu fazy dla bieżącej fali płaskiej $k = 2\pi/\lambda$.

Jeżeli zaproksymujemy go różnicą faz $\Delta\varphi_p$ między ciśnieniami akustycznymi w dwóch punktach pola odległych o Δr i zlogarytmujemy równanie (2.9), to możemy

zdefiniować wskaźnik δ_{pI_r} (pressure – intensity index) stosowany w praktyce pomiarowej [17]

$$\delta_{pI_r} = 10 \lg \left(\left| \frac{k \Delta r}{\Delta \varphi_p} \right| \right) = L_p - L_{I_r} - 10 \lg(\rho c I_0 / p_0^2), \quad (4.17)$$

gdzie: L_p – poziom wartości skutecznej ciśnienia akustycznego względem $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$,

L_{I_r} – poziom modułu natężenia akustycznego $|I_r|$ względem $I_0 = 1 \text{ pW/m}^2$.

Zależność (4.17) ujmuje wzajemny związek między poziomami ciśnienia i natężenia akustycznego, mierzonymi w danym punkcie pola, częstotliwością, odległością między mikrofonami i różnicą faz. Ostatni czynnik we wzorze (4.17), który dla powietrza jest równy 0.16 dB jest zwykle zaniedbywany. Należy podkreślić, że wskaźnik δ_{pI_r} , pomimo że charakteryzuje w pewien sposób strukturę pola akustycznego w danym punkcie, to nie określa jej jednak bezpośrednio i nie jest jedynym wskaźnikiem, bowiem L_{I_r} oznacza tylko poziom składowej natężenia w kierunku r . Mierzona różnica faz jest w istocie sumą różnicy faz między dwoma punktami pola akustycznego $\Delta \varphi_p$ i przesunięcia fazy φ układu pomiarowego (mikrofonów i torów pomiarowych), co można na podstawie zależności (4.17) zapisać w postaci [27]

$$\Delta \varphi_p \pm \varphi = k \Delta r 10^{-0.1 \delta_{pI_r}}. \quad (4.18)$$

Jeżeli zasymulujemy pole akustyczne, w którym $\Delta \varphi_p = 0$, to przesunięcie fazy jest równe

$$\varphi = k \Delta r 10^{-0.1 \delta_{pI,0}}, \quad (4.19)$$

gdzie: $\delta_{pI,0}$ jest zerowym wskaźnikiem pI , t.j. różnicą między poziomami ciśnienia akustycznego L_p i natężenia $L_{I,0}$, kiedy na wejście torów pomiarowych podawany jest ten sam sygnał, co odpowiada np. warunkom pola idealnie dyfuzyjnego.

Na podstawie wzorów (4.18) i (4.19) różnicę faz $\Delta \varphi_p$ można więc wyrazić zależnością

$$\Delta \varphi_p = k \Delta r (10^{-0.1 \delta_{pI_r}} \pm 10^{-0.1 \delta_{pI,0}}). \quad (4.20)$$

Jednocześnie, na podstawie wzoru (2.9), stosunek mierzonej wartości natężenia pola akustycznego $\hat{I}_r$ do rzeczywistej wartości I_r , gdy $\varphi = 0^\circ$, jest równy

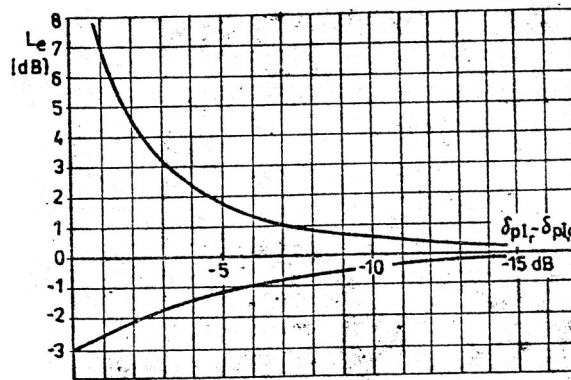
$$\frac{\hat{I}_r}{I_r} = 1 \pm \frac{\varphi}{\Delta \varphi_p}. \quad (4.21)$$

Po podstawieniu zależności (4.19) i (4.20) do wzoru (4.21) otrzymamy wyrażenie na błąd estymacji L_e wyrażony w mierze logarytmicznej, spowodowany przesunięciem fazy φ układu pomiarowego

$$L_e = 10 \lg \frac{\hat{I}_r}{I_r} = -10 \lg(1 \mp 10^{-0.1(\delta_{pI_r} - \delta_{pI,0})}), \quad \text{dB}. \quad (4.22)$$

Z zależności (4.22) wynika, że wielkość błędu przesunięcia fazy zależy tylko od różnicy między wskaźnikami δ_{pI_r} mierzonymi w danym punkcie pola akustycznego i zerowym wskaźnikiem $\delta_{pI,o}$ systemu pomiarowego.

Na rysunku 4.2 pokazano przebieg błędu estymacji L_e określonego wzorem (4.22). Krzywe na tym rysunku są raczej krzywymi korekcyjnymi niż krzywymi błędu. Pokazują o ile mierzony wskaźnik δ_{pI_r} powinien być mniejszy od zerowego wskaźnika $\delta_{pI,o}$, aby błąd spowodowany przesunięciem fazy φ układu pomiarowego był mniejszy od założonej wartości. Jeżeli np. wartość błędu $L_e = \pm 1$ dB, to mierzony wskaźnik δ_{pI_r} pola akustycznego powinien być o około 7 dB mniejszy od zerowego wskaźnika $\delta_{pI,o}$. Oznacza to, że użyteczny zakres dynamiki L_d systemu do pomiaru natężenia metodą dwumikrofonową z błędem ± 1 dB, powinien być równy $L_d = \delta_{pI,o} - 7$ dB.



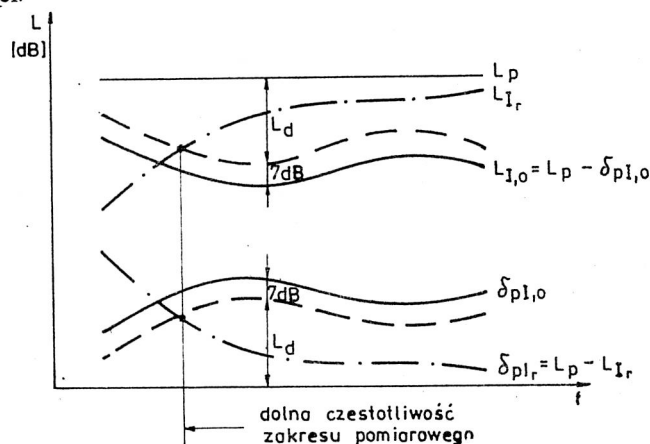
Rys. 4.2. Błąd estymacji L_e natężenia akustycznego wg wzoru (4.22), spowodowany przesunięciem fazy między torami pomiarowymi [27]

Fig. 4.2. Error due to phase mismatch for intensity measurements [27]

Zatem, aby zakres dynamiki L_d był możliwie duży dla danego przesunięcia fazowego φ systemu pomiarowego, odległość między mikrofonami Δr powinna być w zakresie małych częstotliwości możliwie duża, co wynika ze wzoru (4.19). Jest to wymóg przeciwny do wymogu odnoszącego się do wysokich częstotliwości (por. rys. 4.1) oraz do wymogu dyskutowanego w rozdziale 4.3. W praktyce pomiarowej dla zachowania założonego błędu przesunięcia fazy L_e konieczne jest stosowanie różnych odległości Δr , zależnie od przyjętego zakresu częstotliwości, zerowego wskaźnika $\delta_{pI,o}$ systemu pomiarowego oraz mierzonego wskaźnika δ_{pI_r} w danym punkcie pola akustycznego.

Na rysunku 4.3 przedstawiono graficznie sposób wyznaczania dolnej częstotliwości pomiarowej, powyżej której spełniony jest warunek $L_d \geq \delta_{pI_r}$. Rysunek ten obrazuje również podstawowy w praktyce pomiarowej fakt, że do szacowania błędu pomiaru poziomu natężenia akustycznego L_r w danym punkcie pola konieczna jest znajomość nie tylko zerowego wskaźnika $\delta_{pI,o}$, przyrządu pomiarowego, ale także

konieczny jest pomiar poziomu ciśnienia akustycznego. W celu uproszczenia przyjęto na rys. 4.3, że mierzony poziom ciśnienia akustycznego L_p jest stały w funkcji częstotliwości.



Rys. 4.3. Zależność między mierzonymi wielkościami pola akustycznego L_p , L_{I_r} i δ_{pI_r} a parametrami układu pomiarowego $\delta_{pI,0}$ i L_d ; L_p – poziom ciśnienia akustycznego, L_{I_r} – poziom natężenia akustycznego, δ_{pI_r} – wskaźnik pI pola akustycznego, L_d – zakres dynamiki systemu, $\delta_{pI,0}$ – zerowy wskaźnik pI układu pomiarowego

Fig. 4.3. Relationship between sound field and measurement system indicators, where δ_{pI_r} is pressure-intensity index, $\delta_{pI,0}$ is zero pressure-intensity index and L_d is dynamic capability

4.3. Błąd kierunkowości sondy dwumikrofonowej

Jeżeli fala akustyczna pada pod kątem θ , w którym zorientowana jest sonda mikrofonowa, to składowa czynna natężenia akustycznego w kierunku r jest zgodnie ze wzorem (2.2a) równa

$$I_r = \langle p v_r \rangle \cos \theta. \quad (4.23)$$

Jest oczywisty wymóg, aby sonda do pomiaru natężenia akustycznego miała charakterystykę kierunkowości określoną funkcją $Q = 1$ przy pomiarze ciśnienia akustycznego i charakterystykę kierunkowości $Q = \cos \theta$ przy pomiarze prędkości akustycznej. Z zależności (3.3) wynika zatem, że charakterystyka kierunkowości układu dwóch mikrofonów powinna być wszechkierunkowa dla sumy ciśnień akustycznych i cosinusoidalna dla różnicy ciśnień akustycznych. Przy połączeniu synfazowym dwóch wszechkierunkowych mikrofonów ciśnieniowych oddalonych od siebie o Δr , charakterystyka kierunkowości takiego układu określona jest zależnością [30]

$$Q^+ = \cos \left(\frac{\pi \Delta r}{\lambda} \cos \theta \right), \quad (4.24)$$

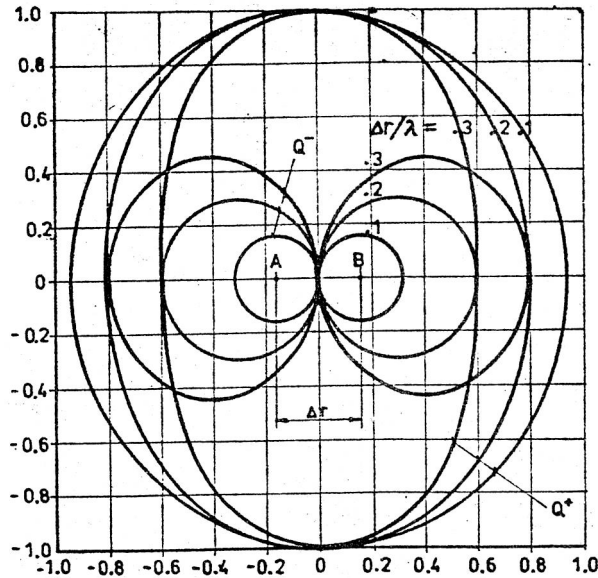
natomiast przy połączeniu przeciwfazowym jest równa

$$Q^- = \sin\left(\frac{\pi \Delta r}{\lambda} \cos \theta\right). \quad (4.25)$$

Jeżeli spełniony jest warunek $\Delta r/\lambda \ll 1$, przy czym λ jest długością fali akustycznej, to – jak to wynika z powyższych zależności – $Q^+ \simeq 1$, a $Q^- \simeq (\pi \Delta r/\lambda) \cos \theta$. Oznacza to, że para wszechkierunkowych mikrofonów ma pożądaną charakterystykę kierunkowości, jeżeli tylko odległość między nimi jest dostatecznie mała w porównaniu z długością fali akustycznej. Spełnienie tego warunku w całym zakresie częstotliwości pomiarowych jest ograniczone zarówno wymiarami geometrycznymi mikrofonów, jak i wielkością sygnału różnicy ciśnień akustycznych w stosunku do poziomu szumów, czyli czułością sondy mikrofonowej. Błąd estymacji natężenia akustycznego spowodowany odstępstwem od pożądanej charakterystyki kierunkowości sondy dwumikrofonowej można określić z zależności [30]

$$L_e = 10 \lg \frac{(2\pi \Delta r/\lambda) \cos \theta}{\sin[2\pi \Delta r/\lambda \cos \theta]}, \text{ dB}. \quad (4.26)$$

Na rysunku 4.4 pokazano przykładowo charakterystyki kierunkowości pary wszechkierunkowych mikrofonów obliczone wg wzorów (4.24) i (4.25) dla różnych wartości stosunku $\Delta r/\lambda$.



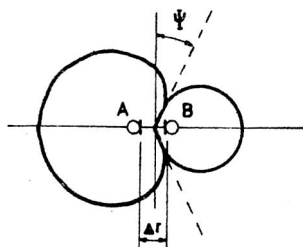
Rys. 4.4. Charakterystyki kierunkowości pary wszechkierunkowych mikrofonów A i B połączonych synfazowo Q^+ i przeciwfazowo Q^- dla stosunku $\Delta r/\lambda =$ parametr

Fig. 4.4. Directivity of a pair of omnidirectional microphones A and B switched conphasely Q^+ and antiphase Q^- for $\Delta r/\lambda =$ parameter

Przesunięcie fazy φ między charakterystykami fazowymi układu pomiarowego, którego wpływ na błąd estymacji natężenia akustycznego omówiono w rozdziale 4.2, zniekształca również charakterystykę kierunkowości sondy.

Na rysunku 4.5 zobrazowano zmianę kierunku minimalnej czułości sondy o kąt ψ , spowodowaną przesunięciem fazowym φ , przy czym słuszna jest zależność [26]

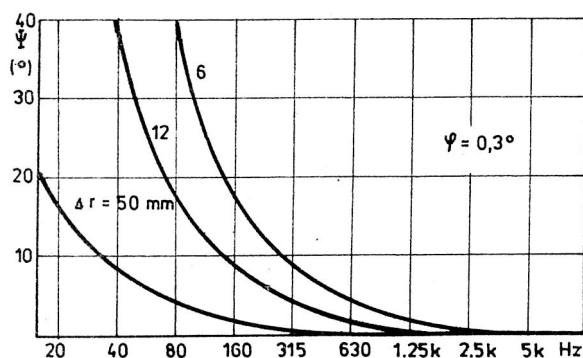
$$\psi = \arcsin(\varphi/k\Delta r). \quad (4.27)$$



Rys. 4.5. Zniekształcenie charakterystyki kierunkowości pary mikrofonów spowodowane przesunięciem fazowym φ

Fig. 4.5. Distortion of the directional characteristics of pair microphones caused by the phase mismatch φ

Przykładowy przebieg zależności (4.27) w funkcji częstotliwości dla przesunięcia fazy $\varphi = 0.3^\circ$ i Δr = parametr, przedstawiono na rys. 4.6. Można zauważyć, że w zakresie małych częstotliwości wartość kąta ψ zmienia się bardzo szybko. Zmiana ta jest tym większa, im mniejsza jest odległość Δr między mikrofonami, co ma istotne znaczenie przy określaniu kierunku przepływu energii akustycznej w polu akustycznym, np. przy identyfikacji dróg propagacji hałasu.



Rys. 4.6. Zmiana kierunku minimalnej czułości sondy mikrofonowej określona kątem ψ wg wzoru (4.27) dla $\varphi = 0.3^\circ$ i Δr = parametr [26]

Fig. 4.6. Angular displacement of the minima axes ψ (acc. to eq. (4.27)) as a function of Δr for $\varphi = 0.3^\circ$ [26]

4.4. Błąd wynikający ze skończonego czasu uśredniania

Istotnym źródłem błędu estymacji natężenia pola akustycznego metodą dwumikrofonową wg zależności (3.3) jest skończony czas uśredniania. Związana z tym wariancja estymatora natężenia $\sigma^2[\hat{I}_r]$ zależy od widma oraz rodzaju pola akustycznego i w ogólnym przypadku jest trudna do określenia. Można pokazać, że w przypadku pola bieżącej fali płaskiej, będącej normalnym szumem białym o ograniczonym paśmie częstotliwości o szerokości B i dla skończonego czasu uśredniania T , względny błąd średniokwadratowy estymatora natężenia określonego wzorem (3.3) jest równy [32]

$$\varepsilon^2 = \frac{\sigma^2[\hat{I}_r]}{E^2[\hat{I}_r]} \approx \frac{1}{BT} \left(\frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} \right)^2. \quad (4.28)$$

Zależności (4.28) jest słuszna dla $BT \gg 5$ i $B \ll f_0$, gdzie f_0 jest częstotliwością środkową pasma częstotliwości. Pomijając współczynnik $(\sin x/x)^2$ we wzorze (4.28), wynikający ze skończonej odległości między mikrofonami Δr , należy zauważyć, że względny błąd średniokwadratowy jest taki sam jak dla wartości średniokwadratowej normalnego szumu białego o ograniczonym paśmie (por. wzór (6.35) w [2]) i zawiera tylko składową błędu losowego, ponieważ błąd obciążenia estymatora $\hat{I}_r$ jest równy zeru. Trzeba również zauważyć, że błąd dany zależnością (4.28) jest dokładnie taki sam dla estymatora natężenia określonego wzorem (3.6), co zostało przekazane w pracy [32].

W pomiarze natężenia w polu akustycznym o dyskretnym widmie, źródłem błędu może być niecałkowita liczba okresów sygnału, który jest uśredniony czasowo. Dla sinusoidalnej fali płaskiej maksymalny błąd względny estymatora (3.3) jest dla tego przypadku rzędu $1/(2\pi N)$, przy czym N jest całkowitą liczbą okresów w czasie uśredniania T , tj. $N = \text{int}(Tf)$. Maksymalny błąd względny estymatora (3.6) dla tego samego przypadku jest rzędu $1/(2\pi Nk\Delta r)$ i jest znacznie większy dla małych częstotliwości [32].

4.5. Błąd spowodowany obecnością źródeł zakłócających

Kolejnym źródłem błędu podczas pomiaru natężenia pola akustycznego jest obecność źródeł zakłócających zarówno wewnętrznych (szumy układu pomiarowego), jak i zewnętrznych (niepożądane źródła dźwięku). Obydwa rodzaje źródeł zakłócających można w zasadzie traktować wspólnie, jako pewien proces losowy na wejściu układu pomiarowego. W poprzednim rozdziale (4.4) stwierdzono, że błąd estymacji natężenia spowodowany skończonym czasem uśredniania zależy nie tylko od widma, ale przede wszystkim od rodzaju pola akustycznego. Istotną sprawą jest zatem opis pola akustycznego, w którym mierzone jest natężenie.

W pracach [27] i [45] została wyprowadzona ogólna zależność na względny błąd standardowy ε_r estymatora natężenia akustycznego, przy założeniu, że na wejścia mikrofonowe A i B układu pomiarowego podane zostały dwie realizacje dwóch stacjonarnych (ergodycznych) procesów losowych. Zależność ta jest następująca:

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma[\hat{I}]}{I} \simeq \frac{1}{\sqrt{BT}} \left(1 + \frac{1 - \gamma_{AB}^2}{2\gamma_{AB}^2 \sin^2(\Delta\varphi_p)} \right)^{1/2}, \quad (4.29)$$

gdzie: $\sigma[\hat{I}]$ jest odchyleniem standardowym estymatora $\hat{I}$,

I – estymowane natężenie akustyczne,

B i T podobnie jak we wzorze (4.28) oznaczają odpowiednio szerokość pasma częstotliwości i czas uśredniania,

γ_{AB}^2 jest funkcją koherencji pomiędzy ciśnieniami akustycznymi w dwóch punktach pola akustycznego A i B ,

$\Delta\varphi_p$ – przesunięcie fazy między tymi ciśnieniami.

Wyznaczenie funkcji koherencji i przesunięcia fazy jest możliwe jedynie wówczas, kiedy znana jest struktura pola akustycznego. Warto rozważyć trzy modele pola akustycznego, wytworzonego przez punktowe źródło dźwięku, pracujące w obecności innych, punktowych źródeł dźwięku, które są źródłami zakłócającymi. Te trzy przypadki są dość typowe w praktyce pomiarowej i dlatego są godne uwagi.

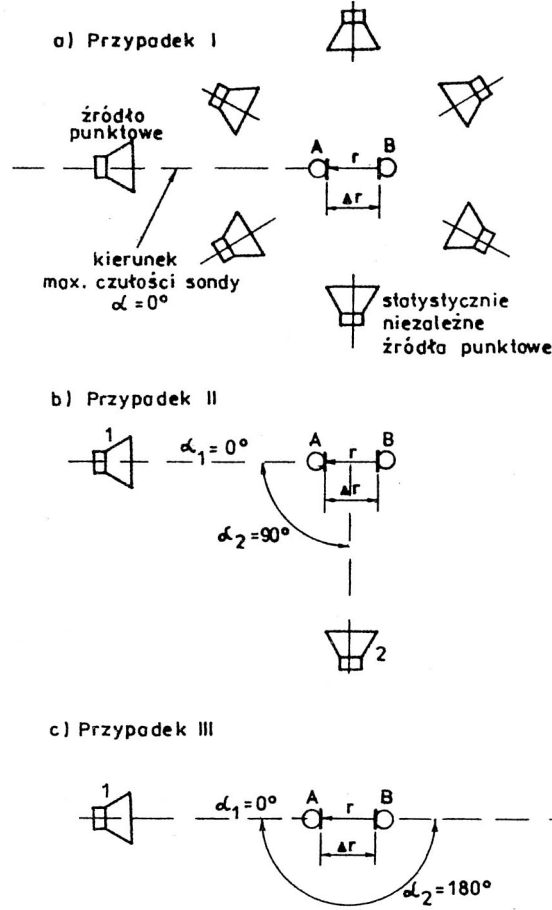
Przypadek I. Punktowe źródło dźwięku umieszczone jest w dyfuzyjnym polu akustycznym całkowicie rozproszonym, np. w komorze pogłosowej. Model pola dyfuzyjnego można również wyobrazić sobie jako zbiór statystycznie niezależnych, punktowych źródeł dźwięku, równomiernie rozmieszczonych na sferze otaczającej parę mikrofonów A i B , przy czym kierunek r , maksymalnej czułości sondy, wyróżnia jedno z nich. Rysunek 4.7a ilustruje graficznie tę sytuację. Przypadek ten można również traktować jako źródło punktowe pracujące w obecności nieskorelowanego, dyfuzyjnego szumu zakłócającego, np. szumu systemu pomiarowego. Dla takiego modelu pola akustycznego funkcja koherencji γ_{AB}^2 i przesunięcie fazy $\Delta\varphi_p$ są równe [21]

$$\gamma_{AB}^2 = \frac{1}{K^2} \left\{ \left((K-1) \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} + \cos(k\Delta r) \right)^2 + \sin^2(k\Delta r) \right\}, \quad (4.30)$$

$$\Delta\varphi_p = \arctg \left(\frac{\sin(k\Delta r)}{(K-1) \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} + \cos(k\Delta r)} \right), \quad (4.31)$$

gdzie: $K = 10^{0.1\delta_{pI_r}}$.

$\delta_{pI_r} = L_p - L_{I_r}$ jest wskaźnikiem pI określonym wzorem (4.17), który jest mierzony w danym punkcie pola akustycznego w kierunku r .



Rys. 4.7. Ilustracja graficzna analizowanych sytuacji: a) źródło punktowe w polu dyfuzyjnym, b) dwa źródła punktowe w układzie prostokątnym ($\alpha_1 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 90^\circ$), c) dwa źródła punktowe na jednej osi ($\alpha_1 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 180^\circ$)

Fig. 4.7. Graphical illustration of analysed situation: a) combination of one point source and diffuse noise, b) combination of two point sources ($\alpha_1 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 90^\circ$), c) combination of two point sources ($\alpha_1 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 180^\circ$)

Przypadek II. Dwa źródła punktowe 1 i 2 umieszczone są na dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, przy czym jedno z nich leży na kierunku r maksymalnej czułości sondy mikrofonowej. Sytuację tę ilustruje rys. 4.7b. Funkcja koherencji i przesunięcie fazy są dla tego przypadku równe [21]

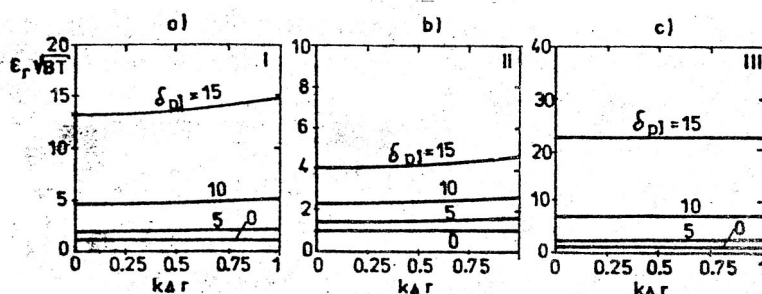
$$\gamma_{AB}^2 = \frac{1}{K^2} [(K - 1 + \cos(k\Delta r))^2 + \sin^2(k\Delta r)], \quad (4.32)$$

$$\Delta\varphi_p = \arctg \left[\frac{\sin(k\Delta r)}{K - 1 + \cos(k\Delta r)} \right]. \quad (4.33)$$

Przypadek III. Dwa źródła punktowe umieszczone są na jednym kierunku r , jak to pokazano na rys. 4.7c. Dla takiej kombinacji źródeł funkcja koherencji i przesunięcie fazy są równe [21]

$$\gamma_{AB}^2 = \cos^2(k\Delta r) + \left[\frac{\sin(k\Delta r)}{K} \right]^2, \quad (4.34)$$

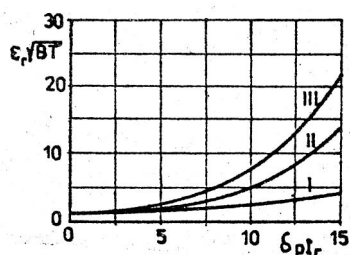
$$\Delta\varphi_p = \arctg \left[\frac{\operatorname{tg}(k\Delta r)}{K} \right]. \quad (4.35)$$



Rys. 4.8. Względny błąd standardowy wg wzoru (4.29) w funkcji $k\Delta r$ dla trzech analizowanych sytuacji jak na rys. 4.7 [21].

Fig. 4.8. Normalized random error (acc. to eq. (4.29)) as a function of $k\Delta r$ for three analyzed cases (see fig. 4.7) [21]

Na rysunku 4.8a – c zilustrowano graficznie wyniki obliczeń błędu estymacji $\varepsilon_r\sqrt{BT}$ wg wzoru (4.29) i wzorów (4.30)–(4.35) dla omówionych trzech przypadków. Można zauważyć, że praktycznie błąd ten nie zależy od częstotliwości ($k = 2\pi f/c$) i odległości między mikrofonami Δr , natomiast w istotny sposób zależy od mierzonego wskaźnika δ_{pI_r} pola akustycznego, czyli jego struktury. Na rysunku 4.9 pokazano wyniki obliczeń błędu $\varepsilon_r\sqrt{BT}$ w funkcji wskaźnika δ_{pI_r} dla trzech rozważanych modeli pola akustycznego, dla jednej, ustalonej wartości $k\Delta r = 0.5$. Dla praktyki pomiarowej



Rys. 4.9. Względny błąd standardowy wg wzoru (4.29) w funkcji wskaźnika δ_{pI_r} dla $k\Delta r = 0.5$ i dla trzech analizowanych sytuacji [21]

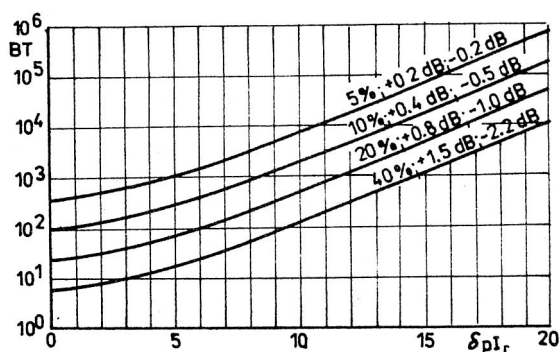
Fig. 4.9. Normalized random error (acc. to eq. (4.29)) as a function of pressure-intensity index δ_{pI_r} for $k\Delta r = 0.5$ and for three analyzed cases [21]

istotne jest wyznaczenie iloczynu BT w zależności od wymaganej wartości błędu ε_r , określonego wzorem (4.29) i mierzonej wartości wskaźnika δ_{pI_r} w danym punkcie pola akustycznego. Ogólnie zależność tę można zapisać jako [27]

$$BT = f_1(\varepsilon_r, \gamma_{AB}^2, \Delta\varphi_p) = f_2(\varepsilon_r, \delta_{pI_r}). \quad (4.36)$$

Na rysunku 4.10 przedstawiono zależność iloczynu BT w funkcji wskaźnika δ_{pI_r} dla $\varepsilon_r = 5, 10, 20$ i 40% . Granice przedziału ufności dla natężenia akustycznego podano dla 68% poziomu ufności. Krzywe na rysunku 4.10 odnoszą się tylko do przypadku I, czyli do pomiaru natężenia akustycznego źródła punkowego w obecności szumu dyfuzyjnego. Z przebiegu tych krzywych wynika, że wzrost wskaźnika δ_{pI_r} o 5 dB wymaga dziesięciokrotnego zwiększenia czasu uśredniania dla zachowania takiej samej statystycznej zgodności estymatora natężenia akustycznego. Dla wskaźnika $K > 1$ słuszna jest przybliżona, liniowa zależność dla przypadku I [27]

$$\varepsilon_r \sqrt{BT} \simeq 0.42(K + 1). \quad (4.37)$$



Rys. 4.10. Względny błąd standardowy i granice przedziału dla natężenia akustycznego dla 68% poziomu ufności w funkcji wskaźnika δ_{pI_r} pola akustycznego dla przypadku I [27]

Fig. 4.10. Normalized random error (68% confidence interval) for intensity measurements; diffuse background noise is assumed (case I) [27]

5. Przyrządy do pomiaru natężenia akustycznego

Mimo iż zasada urządzenia do pomiaru natężenia akustycznego została przedstawiona w patencie Olsona w 1932 r. [37], a metoda wyznaczania sumy i różnicy ciśnień do określania ciśnienia i prędkości akustycznej, będąca podstawą rozwiązań większości mierników natężenia akustycznego, została zaproponowana przez Schultza w 1956 r. [44], to dopiero na początku lat osiemdziesiątych pojawiły się na rynku pierwsze profesjonalne mierniki natężenia akustycznego. Możliwość konstrukcji tego

typu przyrządów wynikała z postępu w dziedzinie elektroniki, jak też technologii nowych tworzyw pozwalających na konstrukcję odpowiednich przetworników.

W ramach Komitetu Technicznego nr 29 IEC powołano Grupę Roboczą 20 (Instruments for the Measurement of Sound Intensity), której zadaniem jest przygotowanie zaleceń normowych dotyczących przyrządów umożliwiających pomiar natężenia akustycznego. W ramach posiedzenia, które odbyło się w Budapeszcie w 1985 r. [31] ustalono między innymi, że przez „przyrząd” należy rozumieć przyrząd przeznaczony do pomiaru natężenia akustycznego lub system zmontowany w celu pomiaru natężenia akustycznego (wyłączono z rozważań mierniki natężenia powierzchniowego). Wprowadzono rozróżnienie sond mikrofonowych na sondy typu ciśnienie – prędkość oraz sondy typu ciśnienie – ciśnienie. Przyjęto, że wymagania dotyczące sondy mikrofonowej nie mogą być wydzielone z ogólnych wymagań dotyczących całego przyrządu, ze względu na możliwość wprowadzenia w przyrządzie kompensacji elektronicznej charakterystyk sondy.

Dotychczas brak jest norm dotyczących tego typu przyrządów, natomiast istnieje już stosunkowo bogaty rynek aparatury pomiarowej natężenia akustycznego.

5.1. Podstawowe rozwiązania mierników natężenia akustycznego

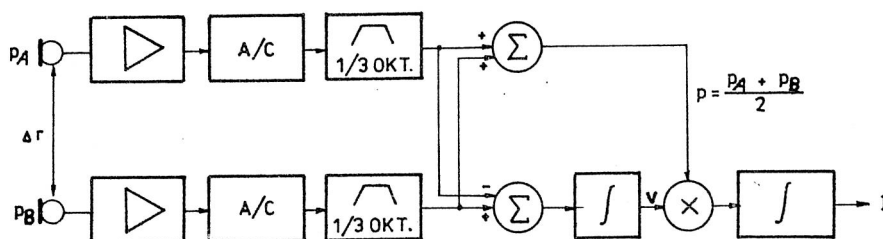
Podstawowe rozwiązania mierników natężenia akustycznego można podzielić na trzy grupy.

Do grupy pierwszej zalicza się przyrządy, w których ciśnienie i prędkość akustyczna mierzone są bezpośrednio (sonda typu ciśnienie – prędkość). Jest to najmniej liczna grupa przyrządów z powodu dużych trudności w konstrukcji przetworników prędkości akustycznej o wymaganych parametrach. Do tej grupy przyrządów można zaliczyć dwukanałowy analizator typu 830 produkowany przez firmę Norwegian Electronics [18] współpracujący z sondą mikrofonową typu 216 [47] (rozdz. 5.3).

Druga grupa przyrządów pomiarowych natężenia akustycznego charakteryzuje się tym, że:

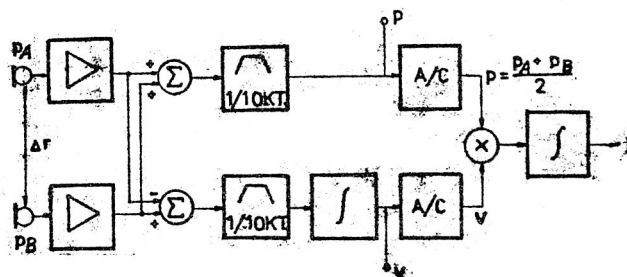
- mierzonym parametrem jest tylko ciśnienie akustyczne,
- prędkość akustyczna jest określona z gradientu ciśnienia.

Jako reprezentatywne dla tej grupy przyrządów można wymienić analizatory natężenia dźwięku (typu 3360 i typu 4433) firmy Brüel & Kjaer [49], [50]. Analizator natężenia dźwięku typu 3360, którego zasadę działania przedstawiono na rys. 5.1, pojawił się na rynku w 1982 r. Umożliwia on analizę w czasie rzeczywistym ciśnienia akustycznego w 42 kanałach 1/3 oktaowych od 1.6 Hz do 20 kHz lub 14 kanałach 1/1 oktaowych od 2 Hz do 16 kHz. Pomiary natężenia dźwięku z wykorzystaniem sondy typu 3519 mogą odbywać się w trzech zakresach częstotliwości: od 250 Hz do 10 kHz (mikrofony 1/4", dystansownik 6 mm); od 125 Hz do 5 kHz (mikrofony 1/2", dystansownik 12 mm); od 31.5 Hz do 1.25 kHz (mikrofony 1.2", dystansownik 50



Rys. 5.1. Schemat blokowy analizatora natężenia dźwięku typ 3360 firmy Brüel & Kjaer, Dania [48]
Fig. 5.1. Block diagram of the Brüel & Kjaer Sound Intensity Analyzer Type 3360 [48]

mm). Wskazania natężenia dźwięku i kierunku propagacji są realizowane na 11" wskaźniku oscyloskopowym. Dołączona do przyrządu jednostka zdalnego sterowania, umożliwia zdalny odczyt wybranego kanału, sterowanie czasami uśredniania oraz wyprowadzaniem wyników pomiarów. W drugiej połowie 1986 r. pojawił się na rynku analizator natężenia dźwięku typu 4433. Uproszczony schemat blokowy tego analizatora przedstawiono na rys. 5.2. Jest to przyrząd przenośny o zasilaniu bateryjnym. Umożliwia on pomiary poziomów ciśnienia, prędkości i natężenia akustycznego. Poziomy te są mierzone sekwencyjnie w pasmach oktaowych o częstotliwościach środkowych od 63 Hz do 8 kHz lub szerokopasmowo przy



Rys. 5.2. Schemat blokowy analizatora natężenia dźwięku typ 4433 firmy Brüel & Kjaer, Dania [49]
Fig. 5.2. Block diagram of the Brüel & Kjaer Sound Intensity Analyzer Type 4433 [49]

włączeniu charakterystyki Lin lub A. Zmiana zakresów pomiarowych odbywa się w sposób automatyczny. Przyrząd współpracuje z sondą mikrofonową typu 3520 [48], wyposażoną w parę mikrofonów 1/2" z dystansownikami 12 mm i 50 mm. Dostarczana z sondą jednostka zdalnego sterowania typu ZB 0015 realizuje funkcje rozpoczęcia i zakończenia pomiarów oraz cyfrowego wyprowadzania wyników. Do tej grupy przyrządów zalicza się również analogowy miernik natężenia dźwięku typu SIM-11, opracowany i wykonany w Instytucie Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej (rozdz. 5.4).

Trzecią grupę przyrządów pomiarowych natężenia akustycznego stanowią wielofunkcyjne dwukanałowe analizatory wykorzystujące algorytm FFT lub korzystające z filtrów cyfrowych. Przy wyznaczaniu natężenia akustycznego korzysta się ze związku tej wielkości z widmem wzajemnym sygnałów ciśnienia akustycznego z dwóch mikrofonów (rozdz. 3.2). Przyrządy te współpracują z sondą typu ciśnienie – ciśnienie. Dobudowywanie opcji pomiaru natężenia akustycznego wraz z odpowiednim oprogramowaniem do wielofunkcyjnych analizatorów sprawia, że jest to obecnie najliczniejsza grupa przyrządów pomiarowych natężenia akustycznego. Przykładem tego typu przyrządów są analizatory typu 2032/34 i 2133 firmy Brüel & Kjaer [19, 20], wielokanałowy analizator widma typu SI 1220 firmy Schlumberger [46], czy też analizator typu 3100 firmy Anada AG [39].

Niezależnie od danej grupy, w przyrządach do pomiaru natężenia akustycznego możemy wydzielić dwa zasadnicze elementy, a mianowicie sondę mikrofonową oraz część elektroniczną przetwarzania sygnałów.

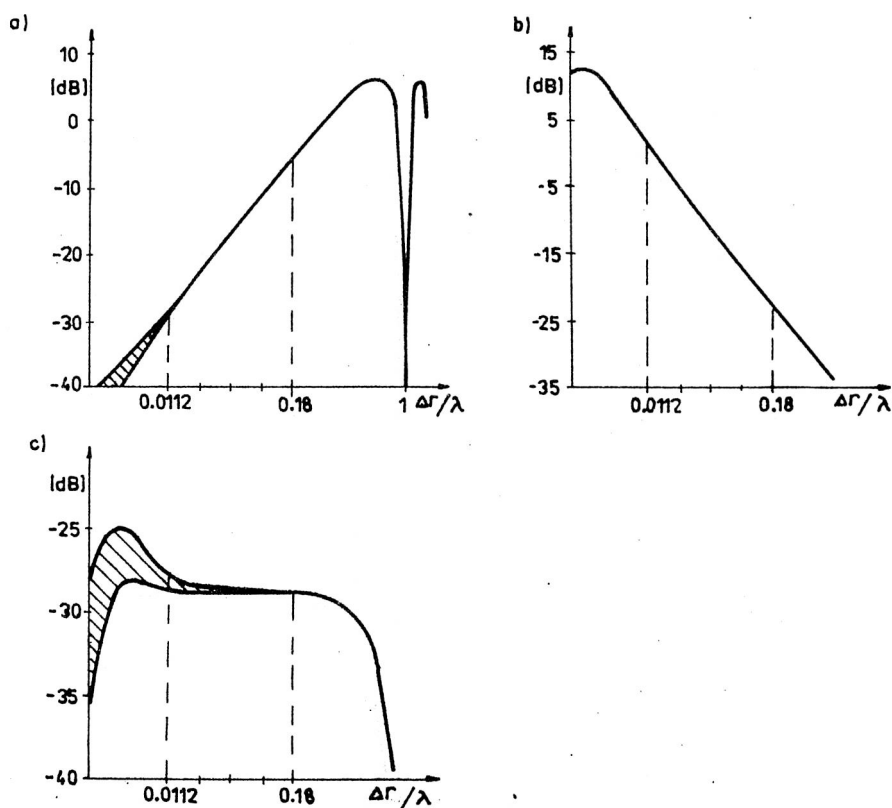
5.2. Problemy konstrukcji aparatury do pomiarów natężenia akustycznego

Wymogi dotyczące aparatury do pomiarów natężenia akustycznego wynikają z omówionych w rozdz. 4. czynników ograniczających stosowalność metod pomiaru natężenia akustycznego. Z przyjętego tam podziału wynika, że błędy oszacowania natężenia akustycznego można podzielić na błędy metody oraz błędy układu pomiarowego. Wpływ obu tych źródeł błędów może być minimalizowany drogą odpowiedniej konstrukcji aparatury pomiarowej.

Konieczny kompromis w wyborze odległości między mikrofonami sprawia, że nie jest możliwy pomiar natężenia akustycznego dla jednej odległości między mikrofonami w całym zakresie częstotliwości akustycznych. Stąd dzieli się ten zakres na podzakresy bądź rozłączne, bądź częściowo się pokrywające. W zależności od błędów aparatury i charakteru mierzonego pola akustycznego szerokość podzakresu może wynosić od 2 do 5 pasm oktaowych.

Aby można było dokonać prawidłowego oszacowania błędu pomiaru, miernik natężenia akustycznego powinien umożliwiać również pomiary ciśnienia akustycznego. Minimalizacja błędów amplitudy i fazy w układzie miernika wymaga takich rozwiązań układowych, które zapewniają właściwy dobór wzmocnień poszczególnych stopni torów pomiarowych dla uniknięcia przesterowań i tym samym optymalne warunki ich pracy. W rozwiązaniach układowych mierników występuje zazwyczaj wyraźne rozdzielenie kanałów ciśnienia i prędkości akustycznej. W kanałach tych zaleca się wprowadzenie niezależnej regulacji wzmocnień. Jest to podyktowane zarówno potrzebą określania podczas pomiarów poziomów natężenia i ciśnienia akustycznego, jak też różnych sytuacji pomiarowych spotykanych przy wyznaczaniu natężenia akustycznego. Dla bieżącej fali płaskiej amplituda sygnału sumy ciśnień wynosi $2p_a \cos(k\Delta r/2)$, natomiast w sygnale różnicowym $2p_a \sin(k\Delta r/2)$. Dla odległo-

ści mikrofonów $\Delta r \simeq 0.18\lambda$, otrzymujemy amplitudę sygnału sumacyjnego równą $1.69p_a$, natomiast różnicowego $1.07p_a$. Jak widać rozpiętość tych sygnałów nie jest zbyt duża. Jeśli podzakres częstotliwości obejmuje cztery pasma oktawowo, to na jego początku odległość między mikrofonami będzie odpowiadać 0.011λ i odpowiednio amplituda sygnału sumacyjnego $1.998p_a$ i różnicowego $0.069p_a$. W tym wypadku rozpiętość tych sygnałów jest już znaczna i należałoby sygnał różnicowy wzmocnić kilkadziesiąt razy. Wprowadzenie stałego wzmocnienia w kanale różnicy ciśnień może prowadzić do znacznych błędów w razie umieszczenia sondy mikrofonowej w pobliżu węzła fali stojącej. W tym wypadku mamy sytuację przeciwną do tej jaka istnieje dla bieżącej fali płaskiej i sygnałem, który powinien zostać wzmocniony jest



Rys. 5.3. Charakterystyki w funkcji stosunku $\Delta r/\lambda$: a) sygnału różnicy ciśnień (zaznaczono wpływ różnicy skuteczności mikrofonów 0.02 dB), b) integratora stosowanego w mierniku SIM-11, c) sygnału różnicy ciśnień po integratorze. Przyjęta szerokość podzakresu częstotliwości obejmuje cztery pasma oktawowo

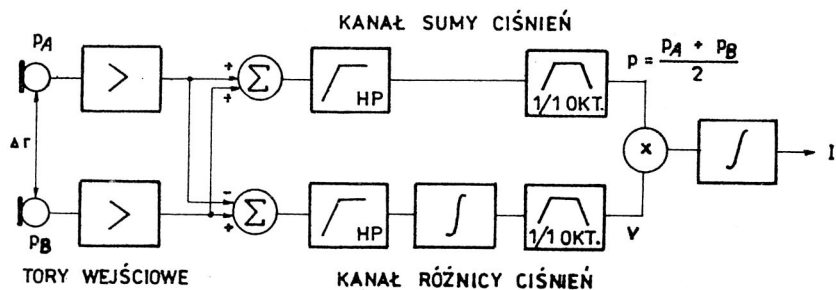
Fig. 5.3. Function of: a) the signal of the difference of pressure levels for a 0.02 dB difference in the sensitivities of microphones, b) the integrator used in the meter type SIM-11, c) the signal of the difference of pressures after the integrator. The adopted width of frequency subranges (four octave bands) has been shown

sygnał sumy ciśnień. Ponieważ tego typu sytuacje pomiarowe nie są wykluczone, optymalnym rozwiązaniem jest niezależna regulacja wzmocnień w obydwóch kanałach.

Jak wynikało z przeglądu podstawowych rozwiązań mierników natężenia akustycznego, przedstawionego w rozdziale 5.1, konstrukcje tego typu mierników są oparte zarówno na technice analogowego, jak i cyfrowego przetwarzania sygnałów. W przypadku analogowych mierników natężenia dźwięku jednym z podstawowych problemów, którego rozwiązanie wpływa na dokładność, a więc i obszar stosowności przyrządu, jest stosowanie filtrów w wyżej wymienionych przyrządach [7].

W układach mierników stosuje się zazwyczaj dwa rodzaje filtrów, a mianowicie filtry górnoprzepustowe i filtry pasmowe, najczęściej o szerokości 1/1 oktawy. Głównym zadaniem filtrów górnoprzepustowych jest zapobieganie przesterowaniu torów sygnałami spoza wybranego podzakresu częstotliwości. Dotyczy to zwłaszcza toru sygnału prędkości akustycznej, który mógłby zostać przesterowany sygnałami wynikającymi z różnic skuteczności zastosowanych mikrofonów, czy też sygnałami o małych częstotliwościach pochodzącymi od zakłóceń lub ruchu ośrodka. Problem ten został zilustrowany rys. 5.3, na którym wykreślono teoretyczne charakterystyki sygnału różnicy ciśnień z uwzględnieniem różnicy skuteczności wkładek mikrofonowych $\Delta S_u = 0.02$ dB (rys. 5.3a), charakterystykę integratora stosowanego w przyrządzie SIM-11 (rys. 5.3b) oraz charakterystykę wypadkową (sygnał różnicy ciśnień po integratorze (rys. 5.3c)). Przyjęta szerokość podzakresu częstotliwości obejmuje cztery pasma oktawowo [8].

Filtry pasmowe pozwalają na otrzymanie informacji o rozkładzie i kierunku przepływu energii w poszczególnych pasmach częstotliwości oraz redukują szumy i zakłócenia.



Rys. 5.4. Uproszczony schemat blokowy miernika natężenia akustycznego

Fig. 5.4. Simplified block diagram of the sound intensity meter

W celu optymalnego rozmieszczenia filtrów w układzie miernika należy przeanalizować błąd określenia natężenia akustycznego spowodowany przesunięciem fazy w torach pomiarowych. Błąd ten zostanie wyznaczony dla bieżącej fali płaskiej. W celu określenia tego błędu założono, że faza jednego z ciśnień działających na membranę mikrofonu zawiera dodatkowo składnik wynikający z różnicy przesunięć

fazowych sygnałów wprowadzanych przez tory wejściowe (przed obwodami sumy i różnicy). Przy tym założeniu można napisać, że

$$\left. \begin{aligned} p_A(x_A, t) &= p_a e^{j[\omega t - k(x_o - \Delta r/2 \cos \theta) + \alpha]} \\ p_B(x_B, t) &= p_a e^{j[\omega t - k(x_o + \Delta r/2 \cos \theta)]} \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

przy czym: Δr – odległość między mikrofonami, θ – kąt między kierunkiem propagacji fali akustycznej a kierunkiem orientacji sondy mikrofonowej, α – różnica przesunięć fazowych w torach wejściowych.

Zakładamy, że oprócz przesunięcia fazy α w torach wejściowych istnieje również przesunięcie fazy β między kanałami ciśnienia i prędkości akustycznej (rys. 5.4).

Z zależności (3.1) oraz (2.3) natężenie akustyczne przy powyższych założeniach można zapisać w postaci

$$\begin{aligned} I &= -\frac{1}{\rho \Delta r} \operatorname{Re} \left\{ p_a e^{j(\omega t - kx_o)} [e^{j(k\Delta r/2 \cos \theta + \alpha)} + e^{-jk\Delta r/2 \cos \theta}] e^{j\beta} \times \right. \\ &\quad \left. \times \frac{-1}{j\omega} p_a e^{-j(\omega t - kx_o)} [e^{jk\Delta r/2 \cos \theta} - e^{-j(k\Delta r/2 \cos \theta + \alpha)}] \right\}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Po przekształceniach otrzymujemy

$$I = \frac{p_a^2}{2\rho \Delta r \omega} \sin(k\Delta r \cos \theta + \alpha) \cos \beta. \quad (5.3)$$

Błąd estymacji natężenia akustycznego jest zatem określony zależnością

$$L_e = 10 \log \left[\frac{\sin(k\Delta r \cos \theta + \alpha)}{k\Delta r \cos \theta} \cos \beta \right]. \quad (5.4)$$

Rozważmy dwa przypadki. Pierwszy, gdy przesunięcie fazy wprowadzane przez tor ciśnienia i prędkości akustycznej jest równe zero ($\beta = 0^\circ$). Na podstawie wzoru (5.4) błąd estymacji jest wówczas równy

$$L_e = 10 \log \left[\frac{\sin(k\Delta r \cos \theta + \alpha)}{k\Delta r \cos \theta} \right]. \quad (5.5)$$

Jest to ogólnie znane wyrażenie na wpływ przesunięcia fazy na błąd aproksymacji natężenia.

W drugim przypadku zakładamy, że przesunięcie fazy α aż do obwodów sumy i różnicy jest równe zero. Wówczas

$$L_e = 10 \log \left[\frac{\sin(k\Delta r \cos \theta)}{k\Delta r \cos \theta} \cos \beta \right]. \quad (5.6)$$

Na podstawie zależności (5.5) i (5.6) możemy stwierdzić, że:

1. O błędzie pomiaru natężenia decyduje błąd fazy w torach wejściowych (łącznie z mikrofonami), przed operacjami sumy i różnicy.

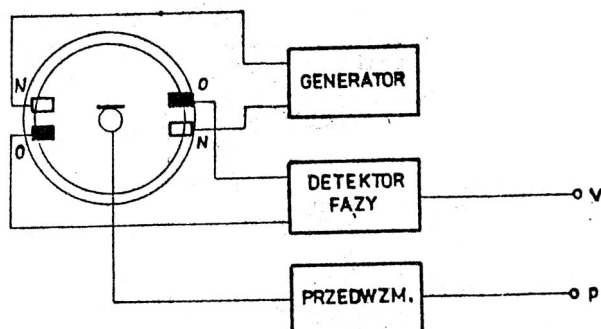
2. Wpływ błędu fazy w kanałach sumy i różnicy jest bardzo mały, mniejszy od 0.1 dB dla $\beta \leq 12^\circ$. Stąd zaleca się umieszczać układy filtrów, jako jedno z istotnych potencjalnych źródeł błędu fazy, w kanałach sumy i różnicy ciśnień. Tego typu konfiguracja układu miernika wymaga wprowadzenia dodatkowej sygnalizacji przesterowania obwodów znajdujących się przed filtrami górnoprzepustowymi. Istotnym zagadnieniem, zwłaszcza w pomiarach *in situ*, jest możliwość zdalnego odczytywania wyników oraz sterowania pomiarami. Celowe jest więc wyposażanie tego typu przyrządów w jednostki zdalnego sterowania realizujące powyższe funkcje. Dodatkowym utrudnieniem w pomiarach natężenia dźwięku jest konieczność prowadzenia pomiarów w wielu punktach siatki pomiarowej. Pojawia się problem gromadzenia i przechowywania wyników pomiarów. Może on być rozwiązany bądź przez wbudowanie jednostek pamięci do przyrządu (typu pamięci dyskowej, czy też pamięci RAM z małym poborem prądu w czasie pamiętania), bądź wyposażenie przyrządu w standardowy układ interfejsu, najczęściej IEC-625 i praca w większych systemach pomiarowych z mikrokomputerem i jego jednostkami pamięci.

Równie istotnym wymogiem związanym z konstrukcją tego typu przyrządów jest prostota ich obsługi i łatwość kalibracji.

5.3. Sondy mikrofonowe

Istotny wpływ na dokładność pomiarów natężenia akustycznego ma bezspornie sonda mikrofonowa. Przetwornik jest pierwszym stopniem w każdym układzie pomiarowym i jego dokładność niejednokrotnie wyznacza całkowity błąd systemu. W pomiarach natężenia akustycznego w układzie sondy mikrofonowej stosuje się zazwyczaj bądź układy przetworników obejmujących przetworniki ciśnienia i prędkości akustycznej, bądź układy obejmujące dwa przetworniki ciśnienia akustycznego. To pierwsze rozwiązanie sondy typu ciśnienie—prędkość mimo swoich istotnych zalet jest stosunkowo rzadko spotykane, z powodu dużych trudności w konstrukcji przetworników prędkości akustycznej o wymaganych parametrach. Podstawową zaletą tego typu sondy jest możliwość prowadzenia pomiarów w szerokim zakresie częstotliwości obejmującym do 9 pasm oktaowych. Wspomniane trudności to przede wszystkim silna zależność częstotliwościowa zarówno charakterystyk amplitudowych, jak i fazowych mikrofonu gradientowego stosowanego w większości tego rodzaju sond [43]. Najbardziej interesującym rozwiązaniem sondy typu ciśnienie—prędkość jest sonda natężenia typu 216 [47] stosowana w dwukanałowym analizatorze typu 830 [18] produkowanym przez firmę Norwegian Electronics. Schemat tej sondy przedstawiono na rys. 5.5. Mikrofon prędkościowy stosowany w tej sondzie składa się z dwóch par przetworników ultradźwiękowych, z których każda obejmuje przetwornik nadawczy i odbiorczy. Przetworniki nadawcze promieniują falę ultradźwiękową o stałej amplitudzie i częstotliwości. Przez porów-

nanie fazy odebranych sygnałów jest wyznaczana różnica w prędkości transmisji fali ultradźwiękowej. Jeśli prędkość dźwięku w ośrodku wynosi c , a prędkość cząstki v , to fala ultradźwiękowa porusza się w jednym kierunku z prędkością $c+v$, a w kierunku przeciwnym $c-v$. Z różnicy tych sygnałów można wyznaczyć prędkość akustyczną. Zakres częstotliwości pomiarowych tej sondy wynosi od 20 Hz do 5 kHz.



Rys. 5.5. Uproszczony schemat blokowy sondy natężenia akustycznego typ 216 firmy Norwegian Electronics [46]; N – nadajnik, O – odbiornik

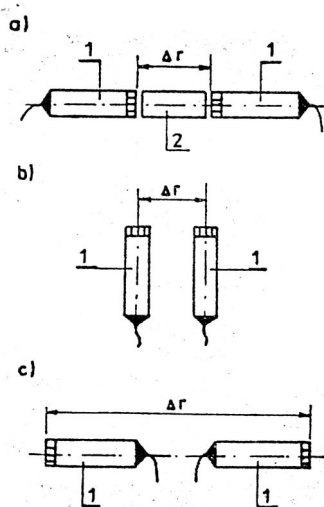
Fig. 5.5. Simplified block diagram of the Norwegian Electronics Type 216 intensity probe [46]; N – transmitter, O – receiver

Najliczniejszą grupę sond mikrofonowych stosowanych w pomiarach natężenia akustycznego stanowią sondy typu ciśnienie – ciśnienie. Zastosowanie dwóch przetworników ciśnienia akustycznego do wyznaczania zarówno ciśnienia akustycznego, jak i jego gradientu narzuca określone wymagania odnośnie konstrukcji tego typu sondy. Powinna ona spełniać następujące wymagania:

- małe wymiary, aby nie zakłócać pola dźwiękowego,
- mała średnica mikrofonów dla punktowego pomiaru ciśnienia,
- bardzo dobra zgodność charakterystyk amplitudowych i fazowych zastosowanych mikrofonów,
- odpowiednia konfiguracja mikrofonów, zapewniająca możliwie stałą, efektywną odległość między mikrofonami,
- wysoka czułość mikrofonów i małe szумы,
- przedwzmacniacze mikrofonowe w niewielkiej odległości od mikrofonów,
- zapewnienie dokładnej regulacji odległości między mikrofonami.

Umieszczenie układu mikrofonów w polu dźwiękowym powinno powodować w minimalnym stopniu zaburzenie tego pola, jak również efekt cienia akustycznego jednego mikrofonu na drugi powinien być minimalny w całym zakresie częstotliwości pomiarowych [52]. Zjawiska dyfrakcji i rozpraszania powodują zmianę efektywnej odległości między mikrofonami. Odległość ta powinna być nie tylko niezależna od częstotliwości, ale również powinna zmieniać się zgodnie z funkcją $\Delta r \cos \theta$, przy

czym θ jest kątem padania fali (wzór (4.16)). Konieczny kompromis między pożądaną czułością mikrofonów a ich rozmiarami sprawia, że w sondach stosuje się zwykle mikrofony o średnicy 1/2" i tylko dla dużych poziomów natężenia mogą być stosowane mikrofony o średnicy 1/4". Jak będzie to pokazane w rozdziale 7, istnieje możliwość kompensacji różnic charakterystyk amplitudowych i fazowych torów pomiarowych łącznie z mikrofonami. Jednakże kompensacja zakłóceń amplitudy i fazy wynikających z odbić dźwięku (zależnych od kąta padania) między mikrofonami i od elementów konstrukcyjnych sondy nie jest możliwa. Błędy pomiarowe stąd pochodzące będą zależały zarówno od kąta padania fali, jak i jej widma, a także od konfiguracji mikrofonów stosowanych w sondzie. Z literatury [13], [22] wynika, że spośród trzech podstawowych konfiguracji mikrofonów pokazanych na rys. 5.6



Rys. 5.6. Podstawowe konfiguracje mikrofonów: a) „face to face”, b) „side by side”, c) „back to back”; 1—mikrofon, 2—dystansownik

Fig. 5.6. Main forms of microphone configurations: a) face to face, b) side by side, c) back to back; 1—microphone, 2—spacer

konfiguracja „face to face” ze stałym dystansownikiem między mikrofonami jest najbardziej korzystna. Komunikacja fal padających z membraną tylko poprzez obwodową perforację a nie wprost od czoła skutecznie eliminuje różnice spowodowane wpływem dyfrakcji i rozpraszania dla kątów padania 0° i 180° . Efektywna odległość między mikrofonami pozostaje w przybliżeniu stała w szerokim zakresie częstotliwości. Dla konfiguracji „side by side”, która umożliwia pomiary najbliższej powierzchni źródła, efektywna odległość między mikrofonami w dużym stopniu zależy od kąta padania fali z uwagi na odbicia i efekty cienia akustycznego jednego mikrofonu na drugi. Odległość ta może się również zmieniać w razie gdy środki

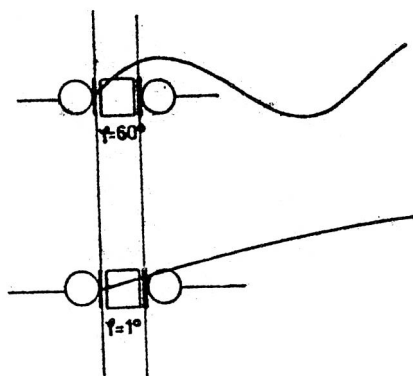
akustyczne nie leżą dokładnie wzdłuż osi wzdłużnej mikrofonów. W tym wypadku podczas obrotu mikrofonu wokół własnej osi efektywna odległość będzie się zmieniać. Dotyczy to oczywiście konfiguracji „side by side”. Jeśli idzie o konfigurację „face to face”, to źródło błędu nie ma praktycznie znaczenia. Zastosowanie stałego dystansownika między mikrofonami dla konfiguracji „face to face” zapewnia utrzymanie dokładnej odległości między mikrofonami. Dzięki jego wymianie można dobierać właściwą odległość między mikrofonami w zależności od wybranego podzakresu częstotliwości pomiarowych miernika. W zależności od charakteru mierzonego pola dźwiękowego na obecnym poziomie techniki mikrofonowej zakres częstotliwości mierzonych dla pojedynczej odległości między mikrofonami może wynosić od 2 do 5 oktav. Stąd w przypadku pomiarów w szerokim zakresie częstotliwości istnieje konieczność zmiany odległości między mikrofonami, co właśnie ułatwia stały dystansownik.

Jak to już podkreślano w poprzednich rozdziałach, kluczowym zagadnieniem przy pomiarze natężenia akustycznego jest pomiar różnicy faz. Dąży się więc, by przesunięcie fazy wprowadzane przez sondę mikrofonową i układ miernika było jak najmniejsze. Mierzona różnica faz w polu dźwiękowym $\Delta\varphi_p$ powinna być zgodnie z zależnością (4.21) 5 razy większa niż błąd fazy przyrządu pomiarowego φ dla dokładności pomiaru natężenia akustycznego ± 1 dB. Wartość błędu fazy określa dolny zakres mierzonych częstotliwości. Zgodnie z (4.15) dla uzyskania błędu ± 1 dB w zakresie dużych częstotliwości, odległość między mikrofonami powinna stanowić około $1/6$ długości fali akustycznej λ , co odpowiada mierzonemu przesunięciu fazy o 60° . Zakładając błąd fazy przyrządu $\pm 0.5^\circ$ jest on do pominięcia w porównaniu z mierzoną fazą, natomiast w zakresie małych częstotliwości, np. dla 63 Hz (długość fali akustycznej $\lambda \simeq 5.5$ m) i dla odległości mikrofonów $\Delta r = 5.5$ mm mierzone przesunięcie fazy wynosi 0.36° , a więc jest mniejsze niż błąd fazy przyrządu. Jeśli dla tej częstotliwości zastosujemy rozstaw mikrofonów $\Delta r = 88$ mm, to przesunięcie fazy wyniesie 5.76° , a więc wynik pomiaru nie będzie już obciążony błędem fazy przyrządu. Przykłady te uzasadniają dlaczego należy stosować zmienny rozstaw mikrofonów.

(Uwaga: podane w przykładzie odległości między mikrofonami 88 i 5.5 mm są stosowane w mierniku natężenia akustycznego SIM-11 – rozdz. 5.4).

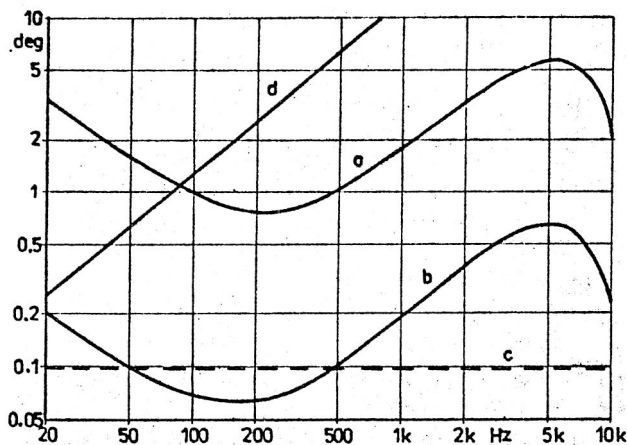
Jako przykład graficzny może służyć rys. 5.7, na którym przedstawiono przebieg zmian fazy dla ustalonej odległości między mikrofonami w zakresie dużych i małych częstotliwości. Błędy wynikające z charakterystyk fazowych mikrofonów są zwykle 2 do 3 razy większe niż występujące w części elektronicznej przyrządu pomiarowego. Na rysunku 5.8 przedstawiono różnice charakterystyk fazowych dla dwóch dowolnie wybranych mikrofonów tego samego typu, dla wyselekcjonowanej pary mikrofonów, dla części elektronicznej przyrządu pomiarowego oraz różnicę fazy między punktami odległymi o 12 mm dla bieżącej fali płaskiej [23].

Istnieją dwa zasadnicze czynniki powodujące znaczny rozrzut charakterystyk fazowych w ramach danego typu mikrofonów pojemnościowych. W zakresie dużych



Rys. 5.7. Przebieg zmian fazy dla ustalonej odległości między mikrofonami w zakresie wysokich i małych częstotliwości

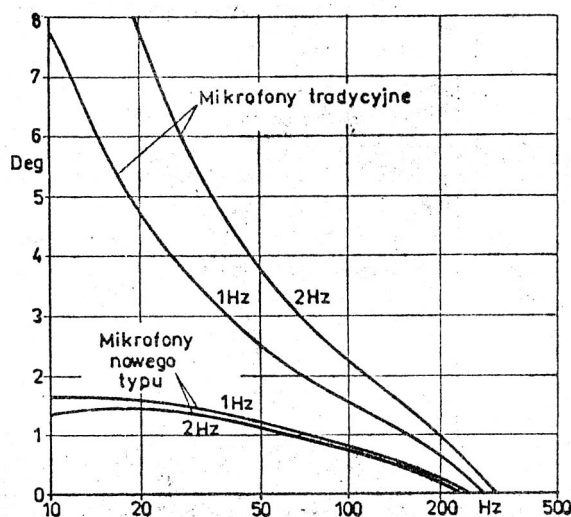
Fig. 5.7. Variation of phase for high and low frequencies for constant distance between the microphones



Rys. 5.8. Różnice charakterystyk fazowych: a) dla dwóch dowolnie wybranych mikrofonów (typ 4165 firmy Brüel & Kjaer), b) dla wyselekcjonowanej pary mikrofonów (typ 4177 firmy Brüel & Kjaer), c) dla części elektronicznej przyrządu pomiarowego, d) między punktami odległymi o 12 mm dla bieżącej fali płaskiej [23]

Fig. 5.8. Phase differences: a) estimated maximum for two arbitrarily chosen microphones Type 4165 B & K, b) maximum for microphone pair Type 4177 B & K, c) typical maximum specified for the electronic part of intensity measurement systems, d) between points spaced by 12 mm in free plane wave [23]

częstotliwości rozrzut ten wynika z tłumienia przemieszczenia membrany, natomiast w zakresie małych częstotliwości wynika z układu wyrównywania ciśnienia [42]. Jak przedstawiono w rozdz. 4.2 błąd fazy mikrofonów jest szczególnie istotny w zakresie małych częstotliwości, dlatego wszelkie próby konstrukcji nowych mikrofonów zmierzają do poprawy ich charakterystyk fazowych w tym zakresie częstotliwości [23], [24]. Z zasady pracy mikrofonu pojemnościowego wynika, że na membranę działa różnica ciśnień pomiędzy ciśnieniem na zewnątrz mikrofonu a ciśnieniem w objętości za membraną. Membrana nie przemieszcza się kiedy zmiany ciśnienia są tak wolne, że powietrze wchodząc do objętości za membraną przez otwór wyrównujący pozwala na wzrost ciśnienia w objętości w takim samym stosunku, jak na zewnątrz membrany. Prędkość wzrostu ciśnienia w objętości jest określona przez objętość przestrzeni za membraną i rozmiar otworu wyrównującego. Dla małych częstotliwości wewnętrzna objętość wkładki może być rozważana jako równoważna pojemności akustycznej C_a , a wpływ rezystancji układu wyrównywania ciśnienia jako oporność akustyczna R_a . Rozbieżność charakterystyk fazowych mikrofonów w zakresie małych częstotliwości wynika z problemu powtarzalności technicznej rezystancji otworu wyrównującego ciśnienie. Dobór par mikrofonów stosowanych w sondach mikrofonowych odbywa się przez porównanie ich charakterystyk fazowych w zakresie małych częstotliwości, co łącznie z niezależną selekcją w zakresie dużych częstotliwości czyni tę procedurę bardzo czasochłonną. Znany producent mikrofonów, firma Brüel & Kjaer, opracował nowe rozwiązania mikrofonów o znacznie lepszych charakterystykach fazowych w zakresie małych częstotliwości [24].



Rys. 5.9. Charakterystyki fazowe mikrofonów tradycyjnych i nowego typu o częstotliwościach granicznych 1 Hz i 2 Hz [23]

Fig. 5.9. Phase characteristics for cut-off frequencies of 1 Hz and 2 Hz of primary venting systems for a new and for a traditional type microphones [23]

Aby rozwiązać problem fazy w zakresie małych częstotliwości należy zmniejszyć wpływ ciśnienia za membraną. Wpływ ten może być zredukowany przez stłumienie wielkości tego ciśnienia i zmianę jego fazy. Jest to realizowane przez wprowadzenie w układzie mikrofonu dodatkowych dwóch obwodów rezystancyjno-podatnościowych włączonych w szereg z pierwotnym otworem wyrównującym ciśnienie. Łączny efekt trzech obwodów wyrównywania ciśnienia polega na redukcji niepożądanego sygnału ciśnienia o około 55 dB dla częstotliwości 20 Hz w stosunku do tradycyjnych mikrofonów i wzroście tego tłumienia ze wzrostem częstotliwości o 18 dB/okt. a nie 6 dB/okt. Na rysunku 5.9 przedstawiono obliczone charakterystyki fazowe mikrofonów tradycyjnych i nowego typu o częstotliwościach granicznych 1 Hz i 2 Hz. Jak wynika z przedstawionych charakterystyk, nowe konstrukcje mikrofonów charakteryzuje znacznie mniejsza dewiacja fazy. Pary tych mikrofonów stosowane w sondach mikrofonowych są tak dobierane, że przesunięcie fazy w zakresie małych częstotliwości jest mniejsze od 0.05° i jest około cztery razy mniejsze w stosunku do dotychczasowych sond mikrofonowych.

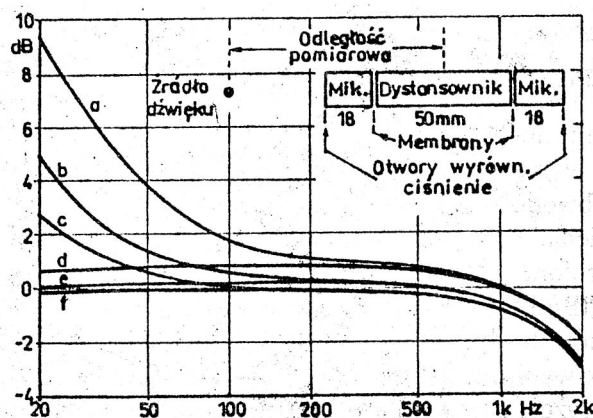
Zastosowanie korektorów fazowych w nowych rozwiązaniach mikrofonów niesie ze sobą dwie dodatkowe korzyści. Obie związane są z faktem, że w tego typu rozwiązaniach czułość przy otworze wyrównującym ciśnienie jest bardzo mała, więc praktycznie są to mikrofony o jednym wejściu. Pierwsza z nich związana jest z możliwością kalibracji tych mikrofonów w komorach o bardzo małej objętości (rozdz. 6). Druga związana jest z bardzo małym błędem pomiarowym w zakresie małych częstotliwości dla pól dźwiękowych o bardzo dużym poziomie gradientu ciśnienia, a więc np. takich jakie występują blisko źródeł punktowych. Przebieg tego błędu dla różnych odległości sondy od źródła punktowego dla tradycyjnych i nowych mikrofonów przedstawiono na rys. 5.10 [24]. Przykładem tego typu nowych konstrukcji mikrofonów są pary mikrofonów 1/2" typu 4181 i 4183 firmy Brüel & Kjaer. W tabeli 2 przedstawiono dane dotyczące ich charakterystyk fazowych, amplitudowych i skuteczności [48].

Tabela 2

Dane dotyczące par mikrofonów typu 4181 i 4183 firmy Brüel & Kjaer

Mierzona wielkość	4181	4183
Różnica charakterystyk fazowych	20 – 250 Hz: $< 0.05^\circ$ 250 Hz – 5 kHz: $< f/5000^\circ$	40 – 700 Hz: $< 0.2^\circ$ 700 Hz – 5 kHz: $< f/3500^\circ$
Różnica charakterystyk amplitudowych (unormowana dla 250 Hz)	20 Hz – 1 kHz: < 0.2 dB 20 Hz – 5 kHz: < 0.4 dB	40 – 700 Hz: < 0.2 dB 40 Hz – 5 kHz: < 0.6 dB
Różnica skuteczności (250 Hz)	< 1 dB	< 2 dB

Pożądana duża skuteczność mikrofonów stosowanych w sondzie wynika z konieczności zapewnienia odpowiedniego stosunku sygnał-szum. Napięcie szumów na wejściu miernika, na które składają się szумы mikrofonów i przedwzmacniacza,



Rys. 5.10: Przebieg błędu pomiaru natężenia w pobliżu źródła punkowego w tradycyjnych i nowych mikrofonach: a), b), c) mikrofony tradycyjne; odległości od źródła odpowiednio 63, 125 i 250 mm, d), e), f) nowe mikrofony dla tych samych odległości [24]

Fig. 5.10. The relative error of acoustic intensity measurements close to a point sources for intensity probe equipped with traditional and with modified microphones: a), b), c) traditional microphones; source distances are 63 mm, 125 mm and 250 mm respectively, d), e), f) modified microphones; same distances respectively [24]

można rozpatrywać jako pochodzące od równoważnego im poziomu ciśnienia akustycznego. Zakłada się więc, że napięcie szumów jest spowodowane przez ciśnienie akustyczne, a mikrofon i przedwzmacniacz są bezszumne. Równoważny poziom ciśnienia można wyznaczyć jako [29]

$$I_{\text{Req}} = 20 \log \frac{U_R}{S_u p_o} \quad (5.7)$$

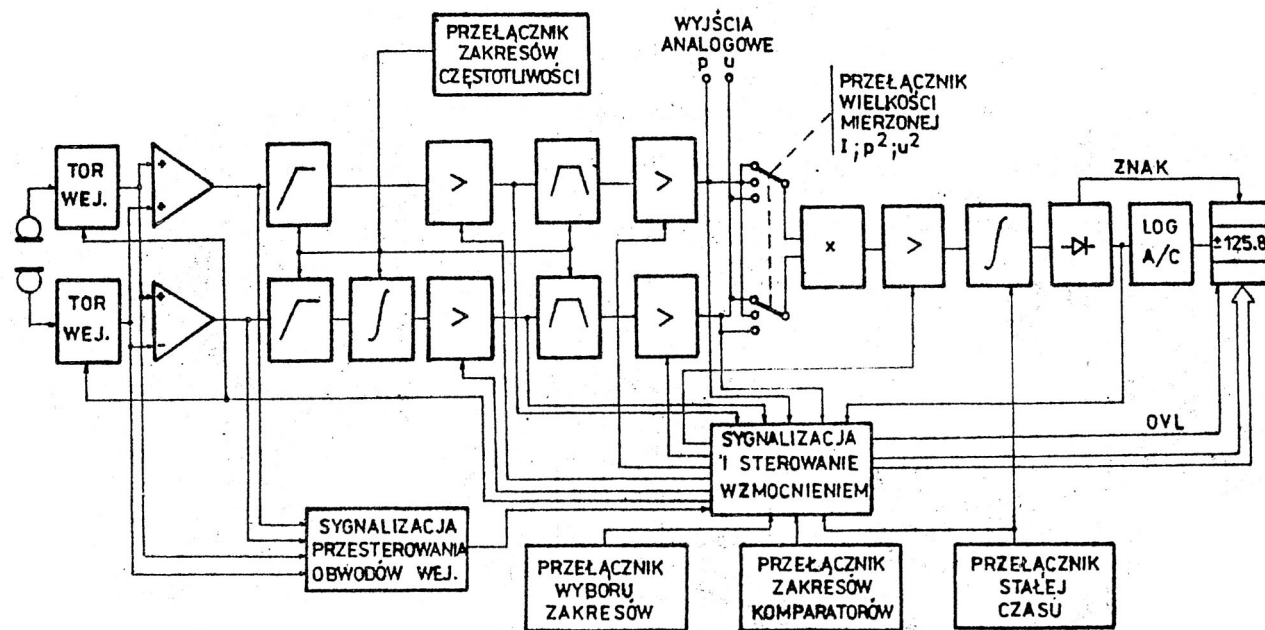
przy czym: U_R – napięcie szumów mikrofonu i przedwzmacniacza,
 S_u – skuteczność napięciowa mikrofonu,
 p_o – ciśnienie akustyczne odniesienia 20 μPa .

Jak wynika z powyższego wzoru równoważny poziom ciśnienia akustycznego jest wprost proporcjonalny do napięcia szumów mikrofonu i przedwzmacniacza, a odwrotnie proporcjonalny do skuteczności napięciowej mikrofonu. Tego typu zależność jest słuszna dla pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego. W pomiarach natężenia akustycznego, przy założeniu, że sygnał szumu w dwóch kanałach jest addytywny i nieskorelowany z sygnałami ciśnienia i że sygnały pochodzące od szumów w tych kanałach stanowią nieskorelowany stacjonarny proces stochastyczny o wartości średniej równej zero, można wykazać, że błąd obciążenia estymatora I_r , wynikający z szumów będzie równy zero [32]. W związku z tym zakres dynamiki mierników natężenia akustycznego może znacznie przewyższać odpowiedni zakres dla mierników poziomu dźwięku. Dolne ograniczenie dynamiki wynika ze skorelowanych części niepożądanych sygnałów jak np. przydźwięk, czy też przesłuchy kanałów.

5.4. Miernik natężenia akustycznego SIM–11

Opracowany i wykonany w Instytucie Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej miernik natężenia akustycznego SIM–11, zgodnie z podziałem przyjętym w rozdziale 5.1, można zaliczyć do drugiej grupy przyrządów, przy czym przetwarzanie sygnałów odbywa się w nim tylko w sposób analogowy [9], [10]. Schemat blokowy miernika natężenia dźwięku SIM–11 przedstawiono na rys. 5.11. Sygnały akustyczne po przetworzeniu ich na postać elektryczną przez mikrofony stanowiące sondę pomiarową są podawane na stopnie wejściowe składające się z zespołu tłumików i wzmacniaczy. Następnie sygnały te podawane są na układy tworzące ich sumę i różnicę. Otrzymane w ten sposób sygnały proporcjonalne do sumy i różnicy ciśnień mierzonych przez dwa mikrofony są następnie filtrowane w zespole filtrów górnoprzepustowych o przełączanej częstotliwości granicznej. Filtry te nie tylko optymalizują zakres mierzonych częstotliwości przez związany z nimi zmienny rozstaw mikrofonów, lecz również zapobiegają przesterowaniu torów sygnałami o małych częstotliwościach. Sygnał różnicy ciśnień jest następnie całkowany w celu otrzymania sygnału proporcjonalnego do prędkości akustycznej. Układ całkujący ma przełączalną minimalną częstotliwość pracy zgodnie z wyborem jednego z dwóch podzakresów częstotliwości, każdy o szerokości czterech oktaw. Po dobraniu ich optymalnych poziomów w układzie tłumików i wzmacniaczy, sygnały proporcjonalne do ciśnienia i prędkości akustycznej są podawane na dwa zespoły filtrów oktawowych o częstotliwościach środkowych 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 i 8000 Hz. Przed podaniem sygnałów na mnożnik następuje kolejna ich optymalizacja. Na wejścia mnożnika podawane są, w zależności od wyboru wielkości mierzonej, bądź sygnały proporcjonalne do ciśnienia i prędkości akustycznej (pomiar poziomu natężenia), bądź sygnały proporcjonalne do ciśnienia akustycznego (pomiar poziomu ciśnienia), względnie sygnały proporcjonalne do prędkości akustycznej (pomiar poziomu prędkości). Sygnał wyjściowy mnożnika, po dobraniu jego optymalnego poziomu, jest podawany na układ integratora wyjściowego o przełączanej stałej czasu. Następnie sygnał podawany jest na układ komparatora znaku i detektora dwupołówkowego. Sygnał przetworzony na postać cyfrową w przetworniku logarytmicznym analogowo-cyfrowym wraz z informacją o zakresie pomiarowym jest sumowany i podawany na wskaźnik cyfrowy.

Współpracująca z przyrządem jednostka zdalnego sterowania obejmuje klawiaturę oraz część wskaźnikową. Klawiatura jednostki zdalnego sterowania może pracować w trzech podstawowych trybach: normalnym, cyfrowym i rozszerzonym. W trybie normalnym istnieje możliwość wyboru wielkości mierzonej, sterowania przełączaniem częstotliwości oktawowych, uruchamianiem i przerywaniem pomiarów, jak też wyboru określonych zmiennych, do których w trybie cyfrowym podstawia się odpowiednie wartości (np. numer i współrzędne punktu pomiarowego, wielkość powierzchni pomiarowej itp.). W trybie rozszerzonym istnieje możliwość sterowania rodzajem wyboru zakresów pomiarowych (automatyczny, ręczny), jak też



Rys. 5.11. Schemat blokowy miernika natężenia dźwięku typ SIM-11
 Fig. 5.11. Block diagram of the Sound Intensity Meter Type SIM-11

kontroli stanów przełączników przyrządu. Część wskaźnikowa oprócz informacji o wartości wielkości mierzonej może również podawać informacje o rodzaju wielkości mierzonej, częstotliwości oktaawowej, stałej czasu i realizacji pomiarów. Współpraca jednostki zdalnego sterowania z miernikiem oraz problem gromadzenia i przechowywania danych w wypadku miernika SIM–11 został rozwiązany drogą jego współpracy z mikrokomputerem wraz z jednostką pamięci dyskowej. System pomiarowy oparty na mierniku SIM–11 jest w pełni uniwersalnym narzędziem badawczym stosowanym w dokładnych i czasochłonnych pomiarach natężenia akustycznego [10], [11].

5.5. Problemy stosowania magnetofonów w układach do pomiaru natężenia akustycznego

W pomiarach terenowych pożądane jest stosowanie lekkiej, przenośnej aparatury o zasilaniu bateryjnym. Tego typu obiecującym rozwiązaniem wydaje się być zastosowanie sondy mikrofonowej ze wzmacniaczami dołączonej do dwukanałowego magnetofonu. Zapis danych pomiarowych na taśmie magnetofonowej narzuca bardzo ostre wymagania stabilności charakterystyk fazowych zastosowanego magnetofonu. Statyczna różnica faz między dwoma kanałami magnetofonu może być kompensowana jeśli się skorzysta z funkcji transmitancji poszczególnych kanałów (rozdz. 7), natomiast nie istnieje możliwość korekcji błędu spowodowanego brakiem stabilności dynamicznej tych charakterystyk. Na podstawie wyników badań [3] trzech podstawowych typów magnetofonów wysokiej klasy, a mianowicie magnetofonu z modulacją kodowo-impulsową (PCM), magnetofonu z modulacją częstotliwości (FM) i magnetofonu o zapisie bezpośrednim stwierdzono, że tylko w pierwszym wypadku charakterystyki fazowe można uznać za bardzo dobre. Magnetofon z modulacją częstotliwości daje wyniki zadowalające, natomiast magnetofon o zapisie bezpośrednim nie nadaje się do pomiarów natężenia akustycznego.

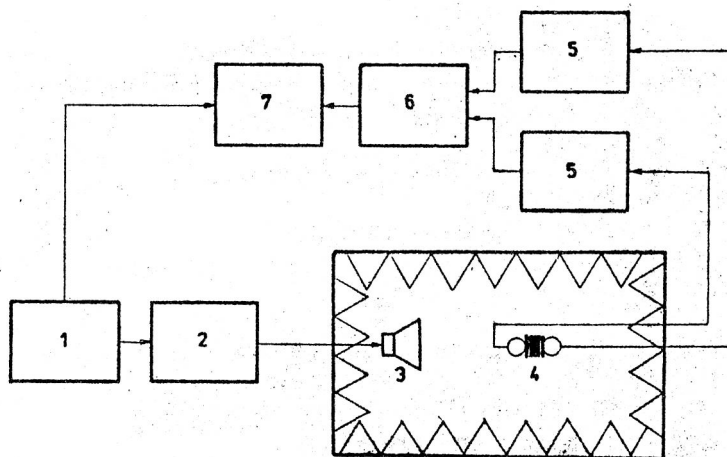
6. Metody kalibracji torów pomiarowych i sondy mikrofonowej

Z równań (3.3) i (3.15) na natężenie określone odpowiednio na podstawie sumy i różnicy ciśnień akustycznych, i widma wzajemnego sygnałów z dwóch mikrofonów wynika, że kompletna kalibracja powinna obejmować kalibrację ciśnienia, efektywnej odległości między mikrofonami i gęstości powietrza. Większość przyrządów pomiarowych natężenia akustycznego wyposażona jest w mikrofony ciśnieniowe, kalibracja obejmuje więc zazwyczaj tylko kalibrację skuteczności ciśnieniowej

kanałów przyrządu. Do tego typu kalibracji wykorzystuje się pistonfony lub kalibratory akustyczne. Jeżeli stosuje się jako sygnał kalibrujący falę akustyczną, to dokonuje się cechowania całego miernika, łącznie z mikrofonami. Jak już wspomniano wcześniej, większość przyrządów pomiarowych natężenia akustycznego służących do mierzenia tej podstawowej wielkości umożliwia również pomiary ciśnienia i prędkości akustycznej. Wartość odniesienia dla poziomów natężenia akustycznego wynosi 1 pW/m^2 , dla poziomów ciśnienia $20 \text{ } \mu\text{Pa}$, a dla poziomów prędkości akustycznej 50 nm/s . Poziomy te zostały tak dobrane, że dla fali płaskiej w polu swobodnym zachodzą następujące związki między poszczególnymi poziomami:

$$\begin{aligned} L_I - L_p &= -0.16 \text{ dB}, \\ L_I - L_v &= 0.16 \text{ dB}. \end{aligned} \quad (6.1)$$

Stąd kalibracja za pomocą źródła o znanym poziomie ciśnienia akustycznego automatycznie kalibruje przyrząd do mierzenia natężenia i prędkości akustycznej z błędami wynikającymi z (6.1). Przy tego typu kalibracji należy zawsze uwzględniać zasadę działania przyrządu, tzn. czy ciśnienie akustyczne wyznaczane jest niezależnie dla poszczególnych mikrofonów, czy też jako średnia arytmetyczna ciśnień z dwóch mikrofonów. W tym ostatnim wypadku poziom ciśnienia akustycznego wskazywany przez przyrząd, przy podaniu sygnału tylko na jeden z mikrofonów, powinien być równy pomniejszonemu o 6 dB poziomowi ciśnienia wytwarzanego przez pistonfon, czy też kalibrator.



Rys. 6.1. Układ pomiarowy efektywnej odległości między mikrofonami: 1 – generator, 2 – wzmacniacz mocy, 3 – głośnik, 4 – sonda mikrofonowa, 5 – wzmacniacz pomiarowy, 6 – miernik fazy, 7 – pisak poziomu

Fig. 6.1. Set-up for measurement of effective microphone separation: 1 – generator, 2 – power amplifier, 3 – loudspeaker, 4 – intensity probe, 5 – measuring amplifier, 6 – phase meter, 7 – level recorder

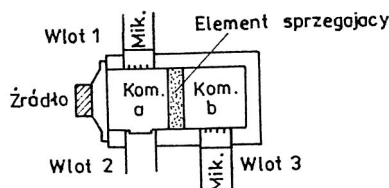
Pomiar efektywnej odległości między mikrofonami realizowany jest dla fali płaskiej w warunkach pola swobodnego w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 6.1. Przez pomiar przesunięcia fazy między sygnałami ciśnienia z dwóch mikrofonów można określić efektywną odległość między mikrofonami. Różnice między tą odległością, a odległością geometryczną są wynikiem zjawisk dyfrakcji i rozpraszania. Gęstość powietrza występująca we wzorach na natężenie jest proporcjonalna do ciśnienia otoczenia i odwrotnie proporcjonalna do temperatury bezwzględnej. Stąd w dokładnych pomiarach natężenia, w zależności od warunków atmosferycznych, należy wprowadzić następującą korekcję [28]:

$$L_{\text{dat}} = -10 \log(P_{\text{atm}}/P_0) + 10 \log(T/T_0),$$

przy czym P_{atm} i T oznaczają aktualnie panujące ciśnienie i temperaturę w ośrodku powietrznym, $P_0 = 0.101325 \text{ MPa}$, $T = 293.15 \text{ K}$.

W praktyce pomiarowej przyjmuje się za wystarczającą kalibrację skuteczności ciśnieniowej przyrządów do pomiaru natężenia akustycznego. Dotyczy to zwłaszcza nowych przyrządów. Okresowe sprawdzenie przyrządów oprócz kalibracji ciśnienia powinno obejmować kalibrację natężenia i ewentualnie prędkości akustycznej, jak też pomiar zerowego wskaźnika $\delta_{pI,0}$ przyrządu pomiarowego wraz z mikrofonami. Tego typu kalibracje wymagają stosowania znanego pola dźwiękowego. Jeden z najczęstszych sposobów sprawdzenia wskazań przyrządu, po uprzedniej kalibracji skuteczności ciśnieniowej, polega na umieszczeniu sondy mikrofonowej w polu bieżącej fali płaskiej. W tych warunkach, zgodnie z zależnością (6.1), poziomy natężenia, ciśnienia i prędkości akustycznej powinny być sobie równe. Tego typu weryfikacja wskazań przyrządu realizowana w warunkach pola swobodnego, np. w komorze bezchowej, pozwala na sprawdzenie wskazań w funkcji częstotliwości i dla odległości między mikrofonami stosowanymi w danym przyrządzie. Problemem pozostaje zapewnienie odpowiednich warunków pola akustycznego.

Opracowany przez firmę Brüel & Kjaer kalibrator natężenia akustycznego typu 3541 pozwala na przezwycięzenie tego problemu [25], [51]. Umożliwia on kalibrację poziomów ciśnienia, natężenia i prędkości akustycznej dla częstotliwości 250 Hz, przy czym te dwie ostatnie mierzone wielkości są wyznaczane dla odległości mikrofonów wynoszącej 50 mm. Na rysunku 6.2 przedstawiono schematycznie przekrój tego kalibratora.



Rys. 6.2. Szkic przekroju kalibratora typ 3541 firmy Brüel & Kjaer, Dania [25]

Fig. 6.2. Principle of the Brüel & Kjaer Intensity Calibrator Type 3541 [25]

Zawiera on źródło dźwięku i specjalny łącznik o dwóch komorach. Komory te mają wloty do dołączania mikrofonów sondy natężenia. Jedna z komór (a) jest dołączana bezpośrednio do źródła, podczas gdy druga komora (b) jest sprzężona z pierwszą poprzez akustyczny element sprzęgający. Dla małych częstotliwości obwód akustyczny utworzony przez element sprzęgający i przez podatność komory (b) sprawia, że amplitudy sygnałów w komorach (a) i (b) są prawie jednakowe, natomiast różnica fazy jest proporcjonalna do częstotliwości. Odpowiada to sytuacji dwóch punktów w polu bieżącej fali płaskiej, stąd kalibrator ten symuluje falę płaską w polu swobodnym o ściśle określonych poziomach ciśnienia, prędkości i natężenia akustycznego. Jako źródło dźwięku stosuje się pistonfon.

Kolejnym istotnym zagadnieniem podczas kalibracji przyrządu jest pomiar zerowego wskaźnika $\delta_{pl,o}$ przyrządu pomiarowego wraz z mikrofonami. Jak wynika to z rozważań przedstawionych w rozdz. 4.2, dokładność pomiarów natężenia akustycznego zależy od błędu fazowego systemu pomiarowego i od wskaźnika $\delta_{pl,r}$ pola dźwiękowego, w którym dokonujemy pomiarów. O poziomie błędu wprowadzanego przez system pomiarowy świadczy wielkość zerowego wskaźnika $\delta_{pl,o}$. Wielkość ta jest definiowana jako różnica między poziomem ciśnienia i natężenia akustycznego, gdy sonda mikrofonowa umieszczona w polu dźwiękowym jest tak zorientowana, że prędkość akustyczna w kierunku pomiarowym jest równa zero. Może to być realizowane przez umieszczenie mikrofonów sondy poprzecznie do kierunku propagacji fali płaskiej, czy też w polu idealnie dyfuzyjnym. Można wykazać, że dla tej samej odległości między mikrofonami i częstotliwości sygnału, różnica między mierzonym w takich warunkach (jednakowa amplituda i faza ciśnień działających na obydwa mikrofony) poziomem ciśnienia i poziomem zerowego natężenia jest stała. W praktyce pomiarowej $\delta_{pl,o}$ wyznacza się korzystając z pobudzenia akustycznego w komorach akustycznych o bardzo małej objętości (pojedyncze cm^3) oraz z pobudzenia elektrostatycznego [37]. Podczas korzystania z komór akustycznych o bardzo małej objętości należy pamiętać, że pobudzenie akustyczne powinno obejmować nie tylko membranę mikrofonu, lecz również otwór wyrównujący ciśnienie. Jest to istotne zwłaszcza w zakresie małych częstotliwości, dla których charakterystyka fazowa mikrofonu może się zmienić w wypadku istnienia różnicy między poziomem ciśnienia na membranie i przy otworze wyrównującym ciśnienie. Ze względu na różne rozmieszczenie tego otworu w zależności od konstrukcji wkładki mikrofonowej, pożądane jest wprowadzenie obydwóch wkładek mikrofonowych do objętości komory. W ten sposób zostają ograniczone minimalne wymiary komory, a tym samym górny zakres częstotliwości. W zakresie dużych częstotliwości zaleca się stosowanie pobudzenia elektrostatycznego. W tym wypadku zmienne napięcie pomiarowe i napięcie polaryzujące podawane są na siatki metalowe umieszczone w odległości ok. 0.5 mm od membran mikrofonów. Przemieszczenie membran powodowane jest przez siłę elektrostatyczną.

Kalibracja sond mikrofonowych, w których zastosowano mikrofony z korektorami fazy jest w znacznym stopniu ułatwiona. Ponieważ mikrofony te możemy

traktować jako układy jednowejściowe (rozdz. 5.3), przeto ich kalibracja może odbywać się w komorach o bardzo małej objętości, w których na działanie ciśnienia wystawiona jest tylko membrana mikrofonu. Stąd stosowanie komór tego typu umożliwia wyznaczenie wskaźnika $\delta_{pI,o}$ przyrządów w całym ich użytecznym zakresie częstotliwości. W opisywanym kalibratorze typu 3541 firmy Brüel & Kjaer, źródło wytwarza szum różowy, którego widmo ciśnienia jest stałe w każdym paśmie oktawowym w szerokim zakresie częstotliwości, a mikrofony sondy są umieszczane naprzeciw siebie (rys. 6.2).

7. Metody eliminacji błędów układu pomiarowego

Błędy układu pomiarowego związane głównie z jego charakterystykami zarówno amplitudowymi, jak i fazowymi mogą w istotny sposób ograniczyć obszar stosowności danego miernika natężenia akustycznego. Znajomość zerowego wskaźnika $\delta_{pI,o}$ przyrządu pozwala na określenie jego zakresu dynamiki, a tym samym wielkości błędu popełnionego w trakcie pomiarów w danym polu akustycznym. W celu rozszerzenia obszaru stosowności przyrządu stosuje się procedury pozwalające na eliminację wpływu błędów układu pomiarowego.

Funkcje transmitancji kanałów pomiarowych w szerokim zakresie częstotliwości niejednokrotnie trudno określić dokładnie. Znajomość tych funkcji pozwala na korekcję wpływu błędów układu pomiarowego. W wypadku analogowych mierników natężenia akustycznego wprowadzenie w ich układach korekcji w celu eliminacji różnic charakterystyk transmitancji kanałów pomiarowych jest przedsięwzięciem bardzo trudnym. Ze względu na to, że drogą starannej kalibracji można uzyskać zgodność charakterystyk amplitudowych w tych miernikach, należy tylko eliminować niezgodność charakterystyk fazowych. Dla tego typu przyrządów realizowane jest to przez obliczanie średniego natężenia z dwóch pomiarów, przy czym drugi pomiar wykonywany jest przy zamianie pozycji mikrofonów.

Wartość średnia estymatora natężenia będzie wyrażona jako

$$\hat{I}_{r,s} = \frac{1}{2}(|\hat{I}_r| + |\hat{I}'_r|), \quad (7.1)$$

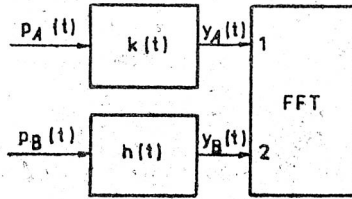
przy czym $\hat{I}_r$ i $\hat{I}'_r$ oznaczają odpowiednio mierzone wartości natężenia w kierunku r przed i po zamianie pozycji mikrofonów.

Po podstawieniu do powyższego wyrażenia zależności na natężenie i uwzględnieniu przesunięcia fazy układu pomiarowego (mikrofonów i torów pomiarowych), otrzymujemy

$$\hat{I}_{r,s} = I_r \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} \cos \varphi, \quad (7.2)$$

przy czym: I_r — dokładna wartość natężenia, k — liczba falowa,
 Δr — odległość między mikrofonami,
 φ — przesunięcie fazy układu pomiarowego.

Jak wynika ze wzoru (7.2), jeśli zastosuje się procedurę zamiany pozycji mikrofonów, to błąd związany z przesunięciem fazy układu pomiarowego jest w praktyce niezależny od częstotliwości i odległości między mikrofonami i jest na ogół do pominięcia, gdyż jego wartość nie przekracza 0.1 dB dla przesunięć fazy $\leq 12^\circ$. Zastosowanie tego typu procedury wymaga dokładnego ustawienia sondy mikrofonowej w punkcie pomiarowym po zamianie pozycji mikrofonów oraz podwojenia czasu trwania pomiarów.



Rys. 7.1. Schemat blokowy torów pomiarowych stosowanych w dwukanałowej analizie FFT

Fig. 7.1. Block diagram of a measurements channels of a dual channel FFT analysis

W przypadku przyrządów, których zasada działania opiera się na dwukanałowej analizie FFT istnieją trzy podstawowe procedury eliminacji wpływu funkcji transmitancji układu pomiarowego. Na rysunku 7.1 przedstawiono w sposób uproszczony schemat blokowy torów pomiarowych stosowanych w dwukanałowej analizie FFT. Sygnały wyjściowe poszczególnych torów pomiarowych można przedstawić jako

$$\begin{aligned} y_A(t) &= p_A(t) * k(t) = \int_{-\infty}^{\infty} p_A(\tau) k(t-\tau) d\tau, \\ y_B(t) &= p_B(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} p_B(\tau) h(t-\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (7.3)$$

przy czym $*$ oznacza operację splotu.

Splotowi transformowanych funkcji czasu odpowiada iloczyn transformat Fouriera [12], stąd

$$\begin{aligned} Y_A(\omega) &= P_A(\omega) K(\omega), \\ Y_B(\omega) &= P_B(\omega) H(\omega). \end{aligned} \quad (7.4)$$

Związek pomiędzy mocą sygnału w dziedzinach czasu i częstotliwości można otrzymać stosując twierdzenie Parsewała [33]. Zgodnie z tym twierdzeniem

$$\int_{-\infty}^{\infty} y_A(t) y_B(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Y_A^*(\omega) Y_B(\omega) d\omega. \quad (7.5)$$

Wzajemna gęstość widmowa sygnałów $y_A(t)$ i $y_B(t)$ jest więc określona jako

$$S_{y_{AB}}(\omega) = Y_A^*(\omega) Y_B(\omega). \quad (7.6)$$

Po podstawieniu do powyższego wzoru zależności (7.4) otrzymujemy

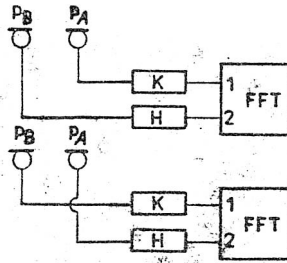
$$S_{y_{AB}} = S_{p_A p_B}(\omega) K^*(\omega) H(\omega), \quad (7.7)$$

przy czym: $S_{y_{AB}}(\omega)$ – mierzona wzajemna gęstość widmowa sygnałów, $S_{p_A p_B}(\omega)$ – wzajemna gęstość widmowa sygnałów z dwóch pozycji mikrofonów A i B w polu akustycznym, $K(\omega)$ i $H(\omega)$ – funkcje transmitancji kanałów pomiarowych.

Jest to podstawowy związek dla wszystkich procedur eliminacji wpływu błędów układu pomiarowego.

W procedurze zamiany pozycji mikrofonów [14], przedstawionej na rys. 7.2, podczas pierwszego pomiaru mierzona wzajemna gęstość widmowa jest określona zależnością (7.7). Jeśli pozycje mikrofonów zostaną zamienione, tzn. sygnał $p_A(t)$ podamy na układ o transmitancji $H(\omega)$, a sygnał $p_B(t)$ na układ o transmitancji $K(\omega)$, otrzymamy

$$S_{y_{AB}}^p(\omega) = S_{p_A p_B}(\omega) K(\omega) H^*(\omega). \quad (7.8)$$



Rys. 7.2. Procedura zamiany pozycji mikrofonów
Fig. 7.2. Interchanging microphones procedure

Po pomnożeniu równania (7.7) i (7.8) stronami i przekształceniu otrzymujemy

$$S_{p_A p_B}(\omega) = \frac{(S_{y_{AB}}(\omega) S_{y_{AB}}^p(\omega))^{1/2}}{|K(\omega)| |H(\omega)|}. \quad (7.9)$$

Stąd w wyrażeniu na natężenie akustyczne określone na podstawie wzajemnej gęstości widmowej sygnałów z dwóch mikrofonów A i B (wzór (3.15)) pojawią się jedynie moduły funkcji transmitancji torów pomiarowych. Obliczanie natężenia za pomocą tej procedury jest dość skomplikowane, gdyż konieczne jest mnożenie zespolone i obliczanie pierwiastka zespolonego. Ponadto wydłuża się dwukrotnie czas pomiarów, istnieją też utrudnienia związane z określaniem kierunku wektora natężenia.

Druga procedura eliminacji błędów układu pomiarowego, tzw. metoda funkcji transmitancji [4], pozwala na ominięcie powyższych trudności. Podając taki sam sygnał na obydwa mikrofony otrzymujemy

$$S_{y_{AB}}(\omega) = S_{pp}(\omega)K^*(\omega)H(\omega). \quad (7.10)$$

Jeśli potraktujemy mikrofon A jako odniesienie, to mierzone widmo własne dla kanału pierwszego możemy zapisać jako

$$S_{y_{AA}}(\omega) = S_{pp}(\omega)K^*(\omega)H(\omega). \quad (7.11)$$

Ze wzorów (7.10) i (7.11) otrzymujemy

$$W_{AB} = \frac{S_{y_{AB}}(\omega)}{S_{y_{AA}}(\omega)} = \frac{H(\omega)}{K(\omega)}, \quad (7.12)$$

przy czym $W_{AB}(\omega)$ jest funkcją transmitancji kalibracji.

W ten sposób stosunek funkcji transmitancji poszczególnych kanałów wyrażony jest przez stosunek wzajemnej gęstości widmowej do widma gęstości mocy kanału A . Po przekształceniu wzoru (7.7) otrzymujemy

$$S_{P_{AP_B}}(\omega) = \frac{S_{y_{AB}}(\omega)}{K^*(\omega)H(\omega)} = \frac{S_{y_{AB}}(\omega)}{|K(\omega)|^2 W_{AB}(\omega)}. \quad (7.13)$$

Wzajemna gęstość widmowa sygnałów elektrycznych jest korygowana przez funkcję transmitancji kalibracji $W_{AB}(\omega)$ między dwoma kanałami i współczynnik wzmocnienia $|K(\omega)|$ pierwszego kanału dla uzyskania poprawnej wzajemnej gęstości widmowej $S_{P_{AP_B}}(\omega)$ sygnałów w dwóch punktach pola akustycznego.

Jak z tego wynika, procedura ta wymaga wcześniejszej kalibracji torów pomiarowych. Metoda ta nie ma wad związanych ze skomplikowanym procesem obliczeń, jak w poprzednio omawianej metodzie, jednak istnieją trudności w określeniu funkcji $W_{AB}(\omega)$ w szerokim zakresie częstotliwości. Problemy tu występujące są takie same jak omawiane dla metod kalibracji przyrządów do pomiaru natężenia omówionych w rozdz. 6.

Procedura trzecia, tzw. zmodyfikowana metoda zamiany pozycji mikrofonów [15], próbuje wyeliminować powyższe trudności kalibracji. W metodzie tej dokonuje się dwukrotnej kalibracji przed i po zamianie pozycji mikrofonów, przy czym nie ma potrzeby by na obydwa mikrofony działał taki sam sygnał, lecz by pole akustyczne, w którym dokonujemy kalibracji było stacjonarne.

Podczas pierwszej kalibracji otrzymujemy

$$W_{AB}(\omega) = \frac{S_{y_{AB}}(\omega)}{S_{y_{AA}}(\omega)} = \frac{S_{P_{AP_B}}(\omega)K^*(\omega)H(\omega)}{S_{P_{AP_A}}(\omega)K^*(\omega)K(\omega)}. \quad (7.14)$$

Po zamianie pozycji mikrofonów mamy

$$W_{AB}^p(\omega) = \frac{S_{y_{AB}}^p(\omega)}{S_{y_{BB}}(\omega)} = \frac{S_{P_{AP_B}}(\omega)K(\omega)H^*(\omega)}{S_{P_{AP_A}}(\omega)H^*(\omega)H(\omega)}. \quad (7.15)$$

Po przekształceniu powyższych równań otrzymujemy

$$\frac{H(\omega)}{K(\omega)} = \sqrt{\frac{W_{AB}(\omega)}{W_{AB}^p(\omega)}}. \quad (7.16)$$

Po zmodyfikowaniu wzoru (7.7) i podstawieniu do niego wzoru (7.16) otrzymujemy

$$Sp_{AP_B}(\omega) = \frac{S_{y_{AB}}(\omega)}{|K(\omega)|^2 \sqrt{\frac{W_{AB}(\omega)}{W_{AB}^p(\omega)}}}. \quad (7.17)$$

Wadą powyższej metody jest to, że wymaga ona obliczania pierwiastka ze zmiennej zespolonej.

Kalibracja stosowana w procedurach opartych na wyznaczaniu funkcji transmitancji torów powinna być okresowo powtarzana.

Jak wynika z powyższej dyskusji, istniejące procedury eliminacji błędów układu pomiarowego wymagają bądź starannej wstępnej kalibracji, wydłużonego czasu pomiarów, bądź też skomplikowanych procedur obliczeniowych. Stąd stosuje się je tylko w tych wypadkach, gdy zakres dynamiki przyrządu L_d jest mniejszy od wskaźnika δ_{pL_r} pola akustycznego (rozdz. 4.2).

8. Uwagi końcowe

Przedstawione w pracy najważniejsze fakty teoretyczne dotyczące opisu wektora natężenia akustycznego i metod jego pomiaru dowodzą zasadniczej odmienności tych metod od dotychczas stosowanych w miernictwie akustycznym. Metody te stwarzają zarówno nową perspektywę w miernictwie akustycznym, jak również rodzą nowe problemy dotyczące opisu zjawisk propagacji fal akustycznych w środowisku akustycznym oraz sposobu analizy i przedstawienia wyników pomiarów wektora natężenia akustycznego.

Omówione dwie metody pomiaru natężenia akustycznego, metoda bezpośrednia oparta na jednoczesnym pomiarze ciśnienia akustycznego i jego gradientu oraz metoda pośrednia polegająca na wyznaczeniu widma wzajemnego ciśnień akustycznych w dwóch punktach pola, wykorzystują technikę dwumikrofonową. Metody te oparte są na aproksymacji gradientu ciśnienia akustycznego skończoną różnicą ciśnień akustycznych mierzonych w dwóch punktach pola. Mają zatem wspólne czynniki ograniczające zakres ich stosowania, które wynikają z przyjętej aproksymacji. Czynniki te prowadzą do określonych błędów pomiaru natężenia akustycznego, nazywanych w pracy błędami metody. Przedyskutowano jedynie niektóre z tych błędów, zdaniem autorów najważniejsze, które równocześnie pozwalają

zorientować czytelnika w możliwych konsekwencjach wynikających ze stosowania tych metod w praktyce pomiarowej.

Najważniejszym stwierdzeniem wynikającym z analizy błędów jest to, że do wyznaczenia błędu natężenia akustycznego spowodowanego skończoną odległością między mikrofonami, konieczna jest znajomość opisu pola akustycznego. Zależności opisujące ten błąd podano dla czterech podstawowych typów fal akustycznych: fali płaskiej, fali kulistej zerowego, pierwszego i drugiego rzędu. Również do wyznaczenia błędu estymacji natężenia akustycznego spowodowanego obecnością źródeł zakłócających konieczna jest znajomość opisu pola akustycznego za pomocą funkcji koherencji sygnałów odpowiadających ciśnieniu akustycznemu w dwóch punktach pola i przesunięcia fazy między tymi sygnałami.

Ogólnie można powiedzieć, że aczkolwiek metody pomiaru natężenia akustycznego dostarczają znacznie więcej informacji o mierzonych zjawiskach akustycznych, to jednak wymagają od użytkownika większej wiedzy teoretycznej i doświadczenia pomiarowego niż metody konwencjonalne oparte na pomiarze ciśnienia akustycznego. Niestety brak międzynarodowych i krajowych norm i zaleceń dotyczących pomiaru określonych wielkości akustycznych metodami natężeniowymi trudności te pogłębiają.

Dotychczas brak jest również ujednoliconych, z podziałem na klasy, norm jakie powinna spełniać aparatura pomiarowa. Tym nie mniej można zauważyć na przestrzeni ostatnich kilku lat znaczny rozwój aparatury służącej do pomiaru natężenia akustycznego.

Dominują w zasadzie dwie tendencje w konstrukcji aparatury. Jedna grupa to przyrządy przenośne, analogowo-cyfrowe oparte na pomiarze sumy i różnicy ciśnień akustycznych w dwóch punktach pola akustycznego, druga grupa to wielofunkcyjne analizatory FFT, znacznie bardziej rozbudowane, umożliwiające pomiar wielu wielkości, w tym również części rzeczywistej i urojonej zespolonego natężenia akustycznego w oparciu o widmo wzajemne dwóch sygnałów odpowiadających ciśnieniom akustycznym.

W konstrukcji sond mikrofonowych dominujące jest rozwiązanie sondy składającej się z dwóch mikrofonów ciśnieniowych 1/2" w układzie „face to face”. Odpowiednie konstrukcje układów elektronicznych w przyrządach oraz odpowiedni dobór odległości między mikrofonami pozwalają ograniczyć błędy metody i błędy układu pomiarowego. Specjalnie opracowane procedury eliminacji błędów układu pomiarowego pozwalają na stosowanie tych przyrządów również wówczas, gdy ich dynamika nie zapewnia odpowiedniej dokładności pomiaru, np. w polu akustycznym wysoce biernym (reaktywnym). Tak więc można powiedzieć, że stosowane obecnie przyrządy do pomiaru natężenia akustycznego są przyrządami dokładnymi w szerokim zakresie częstotliwości.

W praktyce pomiarowej wystarczająca jest kalibracja skuteczności ciśnieniowej przyrządów, jednak podczas okresowego ich sprawdzania potrzebna jest kalibracja zerowego wskaźnika $\delta_{n,0}$ przyrządów wraz z sondą mikrofonową.

Opisany nieco szerzej analogowy miernik natężenia akustycznego SIM-11 jest całkowicie oryginalnym przyrządem opracowanym w Instytucie Telekomunikacji i Akustyki w wyniku kilkuletniej pracy zarówno teoretycznej jak i praktyczno-eksperymentalnej. System pomiarowy oparty na tym mierniku jest w pełni uniwersalnym narzędziem badawczym, które może być stosowane w dokładnych i czasochłonnych pomiarach natężenia akustycznego i stanowi przykład rozwiązania diskutowanych w pracy problemów związanych z konstrukcją aparatury do pomiaru natężenia akustycznego.

Z powodu ograniczonej objętości pracy nie omówiono przykładów zastosowań metod natężeniowych do pomiaru szeregu podstawowych wielkości, jak np. mocy akustycznej, impedancji, czy izolacyjności akustycznej. Zagadnienie implementacji metod natężenia w miernictwie akustycznym ma już swoją bogatą literaturę i wymaga zdaniem autorów oddzielnego, w miarę syntetycznego opracowania.

Literatura

- [1] BAKER S., *An acoustic intensity meter*, J. Acoust. Soc. Am. 1955, vol. 27, no. 2, s. 269-273.
- [2] BENDAT J. Ś., PIERSOL A. G., *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, PWN, Warszawa 1976.
- [3] BENNERHULT O., KÖHLER J., *Sound intensity measurements as a tool in noise reduction work — practical aspects*, *Proceedings of Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement*, Senlis 1985, s. 383-388.
- [4] BLASER D. A., CHUNG J. Y., *A transfer function technique for determining the acoustic characteristics of duct systems with flow*, *Proceedings of Inter-Noise 78*, s. 901-908.
- [5] BOGUSZ B., *Analiza metod jednoczesnego pomiaru ciśnienia akustycznego i jego gradientu w zakresie małych częstotliwości*, Praca doktorska, Raport nr I-28/PRE-029/81 Inst. Telekom. i Akustyki Pol. Wr., Wrocław 1981.
- [6] BOGUSZ B., *Wpływ błędów układu pomiarowego na dokładność określania natężenia akustycznego*, Prace XXX Otwartego Seminarium z Akustyki, Gdańsk 1983, s. 515-518.
- [7] BOGUSZ B., *Problemy stosowania filtrów w układach mierników natężenia akustycznego*, Prace XXXV Otwartego Seminarium z Akustyki, Warszawa 1988, s. 172-177.
- [8] BOGUSZ B., JURKIEWICZ J., *Analogowy miernik natężenia akustycznego*, *Proceedings of Noise Control 85*, Kraków 1985, s. 601-604.
- [9] BOGUSZ B., JURKIEWICZ J., IDCZAK H., *Miernik wektora natężenia dźwięku oparty na dwumikrofonowej metodzie pomiaru ciśnienia akustycznego i jego gradientu. Etap I.*, Raport nr I-28/SPR-047/87 Inst. Telekom. i Akustyki Pol. Wr., Wrocław 1987.
- [10] BOGUSZ B., JURKIEWICZ J., *Miernik wektora natężenia dźwięku oparty na dwumikrofonowej metodzie pomiaru ciśnienia akustycznego i jego gradientu. Etap IIA.*, Raport nr I-28/SPR-040/88 Inst. Telekom. i Akustyki Pol. Wr., Wrocław 1988.
- [11] BOGUSZ B., JURKIEWICZ J., *System pomiarowy natężenia akustycznego*, Prace XXXV Otwartego Seminarium z Akustyki, Warszawa 1988, s. 178-182.
- [12] BRACWELL R., *Przekształcenie Fouriera i jego zastosowanie*, WNT, Warszawa 1968.
- [13] BRÜEL P. V., *Microphone configurations used in acoustic intensity probes*, *Proceedings of Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement*, Senlis 1985, s. 17-22.

- [14] CHUNG J. Y., *Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch*, J. Acoust. Soc. Am. 1978, vol. 64, no. 6, s. 1613-1616.
- [15] CHUNG J. Y., BLASER D. A., *Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties, I. Theory and II. Experiment*, J. Acoust. Soc. Am. 1980, vol. 68, no. 3, s. 907-921.
- [16] CLAPP C. W., FIRESTONE F. A., *The acoustic wattmeter, an instrument for measuring sound energy flow*, J. Acoust. Soc. Am. 1941, vol. 13, no. 2, s. 124-136.
- [17] *Draft Proposal ISO/DP 9614, Determination of the sound power levels of noise sources using sound intensity measurement*.
- [18] *Dual Channel Real-Time Analyzer Type 830*, Norwegian Electronics Product Data.
- [19] *Dual Channel Signal Analyzer Type 2034*, Brüel & Kjaer Product Data BP 0328-11.
- [20] *Dual Channel Real-Time Frequency Analyzer Type 2133*, Brüel & Kjaer Product Data BP 0668-12.
- [21] DYRLUND O., *A note on statistical errors in acoustic intensity measurements*, Journal of Sound and Vibration 1983, vol. 90, no. 4, s. 585-589.
- [22] FAHY F., ELLIOT S., *Practical consideration in the choice of transducers and signal processing techniques for sound intensity measurements*, Proceedings of Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurements, Senlis 1985, s. 37-44.
- [23] FREDERIKSEN E., *Phase characteristics of microphones for intensity probes*, Proceedings of Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement, Senlis 1985, s. 23-30.
- [24] FREDERIKSEN E., SCHULTZ O., *Pressure microphones for intensity measurements with significantly improved phase properties*, Brüel & Kjaer Technical Review 1986, no. 4.
- [25] FREDERIKSEN E., *Acoustic calibrator for intensity measurement systems*, Brüel & Kjaer Technical Review 1987, no. 4.
- [26] GADE S., *Sound Intensity (Part I Theory, Part II Instrumentation and applications)*, Brüel & Kjaer Technical Review 1982, no. 3 i 4.
- [27] GADE S., *Validity of intensity measurement in partially diffuse sound field*, Brüel & Kjaer Technical Review 1985, no. 4.
- [28] GADE S., NIELSEN T. G., GINN K. B., *Sound intensity terminology*, Proceedings of Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement, Senlis 1985, s. 295-300.
- [29] HAMANN M., *Ein Beitrag zur Realisierung eines Schallintensitätsmessverfahrens in der Maschinenakustik*, Dissertation, Hannover 1980.
- [30] HUBNER G., *Higher accuracy in sound power determination of machines under in situ conditions by using sound intensity meter*, Proceedings of Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement, Senlis 1981.
- [31] IEC, *Working Group 20, Instruments for the measurement of sound intensity*, Report on the meeting held in Budapest on 23 April 1985.
- [32] JACOBSEN F., *Measurement of sound intensity*, Report no. 28, 1979, The Acoustics Laboratory of Technical University of Denmark.
- [33] KANDIANIS F., *Correlation techniques in the analysis of transient process*, Journal of Sound and Vibration 1973, vol. 26, no. 2, s. 161-172.
- [34] KWIEK-WALASIAK T., *Metoda bezpośredniego pomiaru natężenia dźwięku dla identyfikacji jego źródeł w realnych warunkach przemysłowych na tle innych metod*, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 35, Kielce 1985.
- [35] MALECKI I., *Teoria fal i układów akustycznych*, PWN, Warszawa 1964.
- [36] MORSE P. M., INGARD K. U., *Theoretical acoustics*, Mc Graw-Hill Book Co., New York 1968.
- [37] OLSON H. F., *System response to the energy flow sound waves*, US Patent No. 1892644, 1932.
- [38] PHAN T. M., *Sound intensity probe calibration — state of the art*, Proceedings of Inter-Noise 88, s. 119-122.
- [39] *Precision Integrating Real-Time Analyzer*, Anada AG Product Data.
- [40] *Proceedings of the 1st International Congress on Acoustic Intensity*, CETIM Senlis (France), 30.09-2.10.1981.

- [41] *Proceedings of the 2nd International Congress on Acoustic Intensity*, CETIM Senlis (France), 23-26.09.1985.
- [42] RASMUSSEN G., *Pressure equalization of condenser microphones and performance at varying altitudes*, Brüel & Kjaer Technical Review 1960, no. 1.
- [43] RIEDLINGER R., *Measurement of sound intensity using a phase and amplitude correcting FFT algorithm*, Proceedings of Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement, Senlis 1985, s. 59-66.
- [44] SCHULTZ T. J., *Acoustic wattmeter*, J. Acoust. Soc. Am. 1956, vol. 28, no. 4, s. 693-699.
- [45] SEYBERT A. F., *Statistical errors in acoustic intensity measurements*, Journal of Sound and Vibration 1981, vol. 75, no. 4, s. 519-526.
- [46] *SI 1220 Multichannel Spectrum Analyzer*, Schlumberger Product Data.
- [47] *Sound Intensity Microphone Type 216*, Norwegian Electronics Product Data.
- [48] *Sound Intensity Probes Types 3519, 3520, 3545, Sound Intensity Microphone Paris Types 4178, 4181, 4183*, Brüel & Kjaer Product Data BP 0497-12.
- [49] *Sound Intensity Analysing System Type 3360*, Brüel & Kjaer Product Data 2-044 0029-2A.
- [50] *Sound Intensity Analyzer Type 4433*, Brüel & Kjaer Product Data BP 0560-12.
- [51] *Sound Intensity Calibrator Type 3541*, Brüel & Kjaer Product Data BP 0703-11.
- [52] TICHY J., *Some effects of microphone environment on intensity measurements*, Proceedings of Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement, Senlis 1981, s. 25-30.

Methods of measurement of acoustic intensity

This paper deals with the estimation of acoustic intensity. A number of fundamental acoustical concepts are defined in terms of power, intensity or energy. Thus, the measurement methods capable of measuring the acoustic intensity, which corresponds with the propagation of real acoustic power in a sound field, are extremely useful and in recent years have become a new tool, both in experimental acoustics and in more practical fields, for instance in noise control. It seems that the intensity method will soon replace the well-established standard methods and undoubtedly will find increasing application. The basic aim of this study is to present the theory of intensity measurement and some of the principles of intensity estimation. Two different methods of acoustic intensity measurement are discussed. The first one is based on simultaneous measurement of the sound pressure and the pressure gradient. This is a direct method. The second one is an indirect method which can be implemented only by means of digital technique. Acoustic intensity is calculated from an imaginary part of the cross-spectrum between the signals from two microphones. In both methods the particle velocity is approximated by a finite pressure difference. The same limitations inherent in this approximation are the sources of several errors of both methods. Errors due to finite microphone separation distance, phase mismatch, directional characteristic of microphone probe, finite integration time and presence of noise sources are considered. The correction procedures for eliminating some of these errors and the methods of intensity measurement system calibration are also outlined. The other aim of this study is to present some instruments and measurement systems for measuring acoustic intensity. The basic solutions of acoustic intensity meters, problems connected with construction of instruments and microphone probes are described. As a particular example the SIM-11-type of the acoustic intensity meter is presented. This instrument was made in the Institute of Telecommunication and Acoustics of Technical University of Wrocław.

Методы измерения акустической интенсивности

В статье рассмотрены вопросы, связанные с методами измерений акустической интенсивности, особенно такими, которые в последнее время оказались наиболее удобными и составляют новое научно-исследовательское орудие измерений акустических полей и свойств акустических источников.

Представлены главные выражения, описывающие акустическое поле при помощи вектора акустической интенсивности и изложены два метода измерения акустической интенсивности. Первый метод основан на одновременном измерении акустического давления и его градиента, второй — на определении взаимного спектра акустических давлений в паре точек акустического поля. Представлены достоинства и недостатки обоих методов. Более подробно рассмотрены ошибки оценки акустической интенсивности, вытекающие из принятой аппроксимации градиента акустического давления конечной разности акустических давлений, меримых в паре точек поля. Эти ошибки можно считать ошибками методов. Рассмотрены ошибки измерительной системы т.е. микрофонных зондов и измерительных трактов и методы калибровки этих приборов. Изложены методы устранения или ограничения этих ошибок.

Характеризуя основные типы измерительных приборов и микрофонных зондов, показаны самые существенные свойства их конструкции. В этом смысле более подробно описан новый, оригинальный аналоговый измеритель акустической интенсивности типа SIM-11, построенный в Институте Дальней Связи и Акустики Вроцлавского Политехнического Института.

SPIS TREŚCI

1.	WPROWADZENIE	5
2.	NATĘŻENIE AKUSTYCZNE. ZALEŻNOŚCI PODSTAWOWE	7
3.	PODSTAWOWE METODY POMIARU NATĘŻENIA AKUSTYCZNEGO	9
3.1.	Pomiar natężenia akustycznego na podstawie sumy i różnicy ciśnień akustycznych . . .	9
3.2.	Pomiar natężenia akustycznego na podstawie widma wzajemnego sygnałów z dwóch mikrofonów	11
4.	BŁĘDY ESTYMACJI NATĘŻENIA AKUSTYCZNEGO METODĄ DWUMIKROFONOWĄ	13
4.1.	Błąd wynikający ze skończonej odległości między mikrofonami	15
4.2.	Błąd wynikający z przesunięcia fazy systemu pomiarowego	18
4.3.	Błąd kierunkowości sondy dwumikrofonowej	21
4.4.	Błąd wynikający ze skończonego czasu uśredniania	24
4.5.	Błąd spowodowany obecnością źródeł zakłócających	24
5.	PRZYZRZĄDY DO POMIARU NATĘŻENIA AKUSTYCZNEGO	28
5.1.	Podstawowe rozwiązania mierników natężenia akustycznego	29
5.2.	Problemy konstrukcji aparatury do pomiaru natężenia akustycznego	31
5.3.	Sondy mikrofonowe	35
5.4.	Miernik natężenia akustycznego SIM-11	43
5.5.	Problemy stosowania magnetofonów w układach do pomiaru natężenia akustycznego . . .	45
6.	METODY KALIBRACJI TORÓW POMIAROWYCH I SONDY MIKROFONOWEJ	45
7.	METODY ELIMINACJI BŁĘDÓW UKŁADU POMIAROWEGO	49
8.	UWAGI KOŃCOWE	53
9.	LITERATURA	55

CONTENTS

1.	INTRODUCTION	5
2.	ACOUSTIC INTENSITY. THEORETICAL RELATIONS	7
3.	BASIC METHODS OF MEASURING ACOUSTIC INTENSITY	9
3.1.	Direct method	9
3.2.	Indirect method (cross-spectral method)	11
4.	ERRORS ASSOCIATED WITH THE TWO-MICROPHONE TECHNIQUE	13
4.1.	Error due to finite microphone separation distance	15
4.2.	Error due to phase mismatch	18
4.3.	Error due to directional characteristics of the microphone probe	21
4.4.	Error due to finite integration time	24
4.5.	Error due to presence of noise sources	24
5.	INSTRUMENTS FOR MEASURING ACOUSTIC INTENSITY	28
5.1.	Basic solutions of acoustic intensity meters	29
5.2.	Constructional problems of instruments for measuring acoustic intensity	31
5.3.	Acoustic intensity probes	35
5.4.	Acoustic intensity meter type SIM-11	43
5.5.	Problems due to used magnetic tape recording in measuring acoustic intensity	45
6.	CALIBRATION METHODS OF INTENSITY MEASUREMENT SYSTEM	45
7.	CORRECTION PROCEDURES FOR ELIMINATING ERRORS OF INTENSITY MEASUREMENT SYSTEM	49
8.	CONCLUSIONS	53
9.	REFERENCES	55

PRACE NAUKOWE INSTYTUTU TELEKOMUNIKACJI I AKUSTYKI
(wydane w latach 1986—1989)

- Nr 52, Monografie nr 23, Phan Anh, *Antennas without phase centres and their applications in radio engineering*, Wrocław 1986
- Nr 53, Monografie nr 24, J. Zarzycki, *Nieliniowa prognoza i modelowanie stochastyczne sygnałów losowych wyższego rzędu*, Wrocław 1986
- Nr 54, Monografie nr 25, D.J. Bem, M. Dąbrowski, M. Zientalski, *Kierunki rozwoju i badań naukowych w telekomunikacji*, Wrocław 1986
- Nr 55, Konferencje nr 17, *Electromagnetic compatibility*, t. I-III, Wrocław 1986
- Nr 56, Konferencje nr 18, IX krajowa konferencja — *Teoria obwodów i układy elektroniczne*, Wrocław 1986
- Nr 57, Monografie nr 26, R. Parosa, *Procesy generacji i stabilizacji plazmy za pomocą mikrofali*, Wrocław 1987
- Nr 58, Konferencje nr 19, XXXIV otwarte seminarium z akustyki, Wrocław 1987
- Nr 59, Monografie nr 27, D.J. Bem, *Telewizja satelitarna*, Wrocław 1988
- Nr 60, Konferencje nr 20, *Oprogramowanie dla kształcenia. VII Międzynarodowa Szkoła Letnia Zastosowań Informatyki w Szkołach Wyższych*, Wrocław 1988
- Nr 61, Monografie nr 28, A. Gabor, *Nieliniowa filtracja stacjonarnych szeregów czasowych*, Wrocław 1989
- Nr 62, Monografie nr 29, *Statystyczny opis cech mierzalnych sygnału mowy polskiej*, Wrocław 1989



Subscription should be sent (at any time of the year) to:

„Ars Polona”

Krakowskie Przedmieście 7, 00-068 Warszawa

Bank account number: PBK XIII Oddz. W-wa 370044-1195-139-11

Zamówienia na prenumeratę można składać:

OR PAN, PKiN, 00-901 Warszawa

Nr konta bankowego: PBK IX Oddz. W-wa, 370031-4792

Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej

są do nabycia w:

P.P. „Dom Książki”

Księgarni Wr 49

Wybrzeże Wyspiańskiego 27

oraz kiosku przy Wydawnictwie Politechniki Wrocławskiej

Plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław

(budynek D-1 PWr.)

ISSN 0324-9328