

Na prawach rękopisu

INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI I AKUSTYKI  
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Dział A

Akustyka

Raport nr I-28/PRE- 099 /79

Wpływ typu zwrotnicy i rozmieszczenia głośników w zestawie głośnikowym na obciążenie odsłuchu

Krzysztof Rudno-Rudziński

PRACA DOKTORSKA

Promotor: doc. dr inż. Janusz Renowski

Słowa kluczowe:  
zestaw głośnikowy  
zwrotnica głośnikowa  
rozmieszczenie głośników  
obciążenie odsłuchu  
niekształcenia linearne  
zauważalność niekształceń  
charakterystyka kierunkowości  
charakterystyka mocowa  
wskaznik lokalizacyjny

Wrocław, 1979

**mgr inż. Krzysztof Rudno-Rudziński**

**Pracownia Percepcji Dźwięku**

**Instytut Telekomunikacji i Akustyki**

**Politechniki Wrocławskiej**

**50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27**

**tel. 206-290**

**Praca wpłynęła do Redakcji w dniu 26.10./1979 r.**



|  | str. |
|--|------|
| WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....  | 5    |
| 1. WPROWADZENIE .....  | 7    |
| 2. PROMIENIOWANIE DŹWIĘKU PRZEZ ZESTAWY GŁOSNIKOWE ...   | 11   |
| 2.1. Charakterystyka kierunkowości zestawu dwu-<br>drożnego .....  | 11   |
| 2.1.1. Równania dla dwóch tłoków płaskich<br>w nieskończonej odgradzie .....   | 12   |
| 2.1.2. Dyskusja założeń .....  | 23   |
| 2.2. Charakterystyka mocowa zestawu dwudrożnego ...  | 30   |
| 2.2.1. Impedancja promieniowania układu<br>źródeł tłokowych .....  | 30   |
| 2.2.2. Moc promieniowana przez układ dwóch<br>źródeł .....   | 33   |
| 2.2.3. Zależność mocy promieniowanej od<br>transmitancji filtrów .....   | 35   |
| 2.2.4. Pomiary charakterystyk mocowych .....   | 38   |
| 2.3. Rozmieszczenie głośników w zestawach a trans-<br>misja informacji kierunkowej w układzie ste-<br>reofonicznym ..... | 44   |
| 2.3.1. Wskaźniki lokalizacyjne w układzie<br>stereofonicznym .....   | 44   |
| 2.3.2. Zależność natężeniowego wskaźnika lo-<br>kalizacyjnego od charakterystyk kie-<br>runkowości zestawów .....        | 48   |
| 3. POMIARY PSYCHOAKUSTYCZNE WŁAŚCIWOŚCI ZESTAWÓW<br>GŁOŚNIKOWYCH .....   | 53   |

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Metodyka pomiarów psychoakustycznych .....   | 54 |
| 3.1.1. Procedury pomiarowe .....  | 54 |
| 3.1.2. Słuchacze .....  | 55 |
| 3.1.3. Sygnały .....  | 56 |
| 3.1.4. Pomieszczenia odsłuchowe .....   | 56 |
| 3.1.5. Aparatura pomiarowa .....  | 57 |
| 3.2. Zauważalność zniekształceń wynikających<br>z rozmieszczenia głośników przy transmisji<br>monofonicznej ..... | 57 |
| 3.2.1. Układ pomiarowy .....  | 59 |
| 3.2.2. Pomiary przy użyciu modelu zestawu ....  | 61 |
| 3.2.3. Weryfikacja badań modelowych .....   | 67 |
| 3.3. Zauważalność zniekształceń przy transmisji<br>stereofonicznej .....  | 72 |
| 3.4. Badania wpływu rozmieszczenia głośników w zes-<br>tawach na obszar odsłuchu stereofonicznego ...             | 74 |
| 3.4.1. Układ pomiarowy .....  | 75 |
| 3.4.2. Wyniki i wnioski .....   | 76 |
| 4. OPTIMALIZACJA ROZMIESZCZENIA GŁOSNIKÓW W ZESTAWIE<br>GŁOSNIKOWYM .....   | 81 |
| 4.1. Projekt rozmieszczenia głośników jako część<br>składowa projektu zestawu .....                               | 81 |
| 4.2. Kryterium optymalizacji .....  | 82 |
| 4.3. Związek obszaru odsłuchu z geometrią zestawu .   | 83 |
| 4.4. Wykorzystanie wyników pomiarów zauważalności<br>przy projektowaniu .....                                     | 86 |
| 5. PODSUMOWANIE .....   | 91 |
| LITERATURA .....  | 95 |

## WPLYW TYPU ZWROTNICY I ROZMIESZCZENIA GŁOŚNIKÓW W ZESTAWIE GŁOŚNIKOWYM NA OBSZAR ODSŁUCHU

Poddano analizie promieniowanie dźwięku przez zestaw głośnikowy w zależności od typu zwrotnicy i rozmieszczenia głośników. Wyprowadzono równania charakterystyki kierunkowości zestawu. Zbadano charakterystykę mocową zestawu. Przeprowadzono analizę wskaźników lokalizacyjnych w układzie stereofonicznym.

Wnioski, wynikające z analizy teoretycznej, poddano weryfikacji psychoakustycznej. Wykonano pomiary psychometryczne zauważalności zniekształceń linearynych wynikających z różnicy odległości od poszczególnych głośników w zestawie do słuchacza. Dokonano porównania zauważalności zniekształceń przy transmisji monofonicznej i stereofonicznej. Zmierzono natężeniowe wskaźniki lokalizacyjne w układach stereofonicznych.

Rezultaty analizy teoretycznej oraz pomiarów psychoakustycznych posłużyły do sformułowania zasad projektowania optymalnego rozmieszczenia głośników w zestawach głośnikowych oraz pozwoliły określić zalecenia co do sposobu rozmieszczenia głośników w układach stereofonicznych.

### WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a - promień tłoka, m
- c - prędkość dźwięku w powietrzu w warunkach normalnych, m/s
- d - odległość pomiędzy głośnikami, m
- $f_0$  - częstotliwość rozdziału zwrotnicy, Hz
- $h^0$  - przesunięcie zastępczego źródła punktowego głośnika w głąb obudowy, m
- k - przesuwność jednostkowa,  $m^{-1}$
- p - ciśnienie akustyczne, Pa; rząd filtru Butterwortha
- t - opóźnienie znormalizowane
- $t_{np}^n$  - wartość progowa opóźnienia znormalizowanego
- $u_{np}$  - prędkość objętościowa, m/s
- v - prędkość liniowa, m/s
- B<sub>j</sub> - bodziec porównywany
- $D^j(\omega, \varphi)$  - charakterystyka kierunkowości układu /  $\omega = \text{const}$  /, charakterystyka amplitudowa /  $\varphi = \text{const}$  /
- F - transmitancja filtru
- $J_1(x)$  - funkcja Bessela pierwszego rodzaju pierwszego rzędu zmiennej x
- $M(t_n)$  - rozetęp charakterystyk, dB
- N - moc czynna, W

- P(C) - frakcja poprawnych odpowiedzi, %
- PW - metoda przymusowego wyboru
- R - natężeniowy wskaźnik lokalizacyjny, dB
- SB - metoda stałych bodźców
- T - czasowy wskaźnik lokalizacyjny, s
- W - bodziec wzorcowy
- Z - zauważalność, %
- $\eta(\omega)$  - charakterystyka mocowa
- $\rho$  - gęstość powietrza w warunkach normalnych, kg/m<sup>3</sup>
- $\tau$  - opóźnienia czasowe odpowiadające różnicy odległości od poszczególnych głośników do punktu obserwacji, s
- $\psi$  - przesunięcie fazowe
- $\omega$  - pulsacja, s<sup>-1</sup>
- $\omega_n$  - pulsacja znormalizowana do pulsacji rozdziału zwrotnicy,
- $\omega_0$  - pulsacja rozdziału zwrotnicy
- a - wartość chwilowa
- A - wartość skuteczna
- $\underline{A}$  - wartość skuteczna zespolona

## 1. WPROWADZENIE

Głośnik magnetoelektryczny w obudowie jest najczęściej spotykanym przetwornikiem elektroakustycznym spośród stosowanych w urządzeniach dźwiękonadawczych. Zasadnicze elementy konstrukcji głośnika nie zmieniają się od ponad 50 lat [49]. Również podstawowe typy obudów głośnikowych pochodzą z tamtego okresu - obudowę z otworem opatentował Thuras w roku 1930 [76], obudowę z membraną bierną Olson w roku 1935 [40]. Mimo to wiedza o urządzeniach głośnikowych nie jest kompletna. Rosnący poziom wymagań co do jakości transmisji dźwięku jest przyczyną, dla której wciąż prowadzone są badania w tej dziedzinie. Wiele prac o dużym znaczeniu ukazało się w ostatnich latach. Jednolita metoda analizy urządzeń głośnikowych w zakresie małych częstotliwości została opublikowana przez Smalla w latach 1971-1974 [58-66]. Wpływ elementów układu zastępczego głośników na charakterystyki zestawu dwudrożnego z filtrami pierwszego i drugiego rzędu przedstawił Benson w roku 1973 [10]. Ścisłą teorię drgań i promieniowania stożkowej membrany głośnika podali Frankort w roku 1975 [21] i Dobrucki w roku 1978 [19].

W chwili obecnej dobrze rozwinięta jest teoria urządzeń głośnikowych w zakresie małych częstotliwości, w którym można stosować układy zastępcze i korzystać w analizie z metod teorii obwodów. Małe wymiary zestawu w stosunku do długości fali pozwalają na przyjęcie założeń, ułatwiających również analizę pola akustycznego zestawu.

W zakresie średnich i dużych częstotliwości akustycznych założeń tych nie można stosować. Kształty obudów głośnikowych, mimo iż mało skomplikowane geometrycznie, stają się tu przyczyną poważnych trudności obliczeniowych. Dlatego też w analizie pola akustycznego zakłada się, że głośnik jest umieszczony w nieskończonej odgradzie [19] lub w innej obudowie o prostych do analizy kształtach,

na przykład na końcu długiej rury [56] . Stosuje się też metody przybliżone, jak metoda graficzna [51] . Opracowania te dotyczą promieniowania pojedynczego głośnika.

Urządzenia głośnikowe wysokiej klasy są najczęściej zestawami kilku głośników, przeznaczonych do pracy w różnych zakresach pasma częstotliwości akustycznych. Odpowiedni podział sygnału pomiędzy głośniki zapewniają filtry, zawarte w zwrotnicy głośnikowej. Filtry dobiera się w taki sposób, aby sygnał wypadkowy, wynikający ze zeumowania sygnałów doprowadzanych do poszczególnych głośników, nie był zniekształcony w stosunku do sygnału na wejściu zestawu [3,31,75] .

Rozwój metod syntezy filtrów elektrycznych oraz wprowadzenie zwrotnic aktywnych sprawiły, że w ostatnich latach przedstawiono wiele typów zwrotnic , spełniających powyższy warunek [2,3,6,7,68] . Rozwiązania te wniosły jednak jedynie ilościowy postęp do zagadnienia projektowania zestawów głośnikowych. Stosowane zasady syntezy zwrotnic, nie uwzględniające właściwości akustycznych układu głośników, prowadzą bowiem do optymalnych charakterystyk zestawów tylko w jednej płaszczyźnie, wytyczonej przez punkty równoodległe od głośników.

Fakt występowania zniekształceń linearnych sygnału wywołanych różnicą odległości od poszczególnych głośników w zestawie do punktu odbioru jest znany, lecz jak dotąd nie opublikowano wyników analizy tego zjawiska. W opracowaniach literaturowych zaleca się ograniczenie jego skutków poprzez umieszczanie głośników w minimalnej możliwej odległości względnie zamocowanie koncentryczne [36,67] . W najgłębiej chyba wchodzącej w problem promieniowania dźwięku przez zestaw głośnikowy pracy Linkwiltza [38] wyznaczono skręcenie osi maksymalnego promieniowania przy pulsacji równej pulsacji rozdziału zwrotnicy. W pracy tej zaleca się umieszczanie głośników w zestawie pionowo jeden nad drugim i stosowanie linii opóźniającej w celu sprowadzenia zastępczych źródeł punktowych głośników do płaszczyzny płyty czołowej. W podejściu



Linkwitsza, uwzględniającym pewne aspekty akustyczne, dominuje jednak dążenie do uzyskania możliwie najlepszej charakterystyki zestawu na osi głównej. Podobne efekty jak stosowanie linii opóźniającej daje usytuowanie głośników w taki sposób, aby ich zastępcze źródła punktowe znajdowały się w jednej płaszczyźnie [ 7 ], co zapewnia równomierną charakterystykę fazową zestawu, ale również w jednej tylko płaszczyźnie.

Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu typu zwrotnicy głośnikowej i rozmieszczenia głośników w płycie czołowej zestawu na obszar odsłuchu przy transmisji monofonicznej i stereofonicznej i stworzenie w ten sposób podstaw do optymalizacji rozmieszczania głośników w zestawach pod względem obszaru odsłuchu.

Obszar odsłuchu rozumiany jest tu jako ta część pola akustycznego urządzenia dźwiękonadawczego, w której zniekształcenia linearne sygnału, wywołane różnicą odległości od poszczególnych głośników, a występujące przy oddalaniu się słuchacza od osi urządzenia, są dla niego niezauważalne. Przy transmisji monofonicznej zauważalność zniekształceń linearnych jest rozpatrywana w sensie bezwzględnego progu zauważalności, przy transmisji stereofonicznej natomiast w sensie zmian lokalizacji pozornego źródła dźwięku. Ponieważ zniekształcenia linearne omawianego typu, a więc i obszar odsłuchu, opisywane są przez charakterystyki kierunkowości zestawów w funkcji kąta mierzonego od osi urządzenia, graniczne wartości tego kąta będą w pracy stosowane do określenia wielkości obszaru odsłuchu.

Zagadnienie projektowania rozmieszczenia głośników w zestawie było, jak dotąd, traktowane wyłącznie z punktu widzenia właściwości fizycznych zestawu. Stąd też możliwe było uzyskanie optymalnych charakterystyk tylko dla jednego kierunku lub jednej płaszczyzny promieniowania. Uwzględnienie faktu, iż pewne zmiany sygnału, jakkolwiek mierzone fizycznie, są niezauważalne dla człowieka, pozwoli określić prawidłowo nadzwyczajowy obszar.

Aby zrealizować cel pracy zostanie dokonana analiza promieniowania dźwięku przez zestawy głośnikowe oraz zostaną wykonane pomiary psychoakustyczne wpływu rozmieszczenia głośników w zestawie na percepcję transmitowanego dźwięku.

Analiza promieniowania ma dostarczyć danych dotyczących wpływu rodzaju zwrotnicy i rozmieszczenia głośników na właściwości kierunkowe zestawu, na jego charakterystykę mocową oraz wskaźniki lokalizacyjne przy transmisji stereofonicznej. Znajomość charakterystyk kierunkowości pozwoli określić zniekształcenia linearne, występujące przy odsłuchu pod danym kątem od osi głównej zestawu. Charakterystyka mocowa dostarcza danych o właściwościach zestawu pracującego w normalnym pomieszczeniu, w którym do słuchacza docierają dźwięki zarówno bezpośrednio od źródła, jak też po odbiciach od powierzchni ograniczających. Wskaźniki lokalizacyjne, wyrażone w funkcji kąta pomiędzy osią zestawu a kierunkiem odsłuchu, pozwolą określić wrażliwość stereofonicznego układu odsłuchowego na przemieszczenia słuchacza od osi układu.

Zadaniem pomiarów psychoakustycznych jest weryfikacja analizy fizycznej z punktu widzenia percepcji dźwięku przez człowieka. Mają one na celu ustalenie, które z parametrów fizycznych zestawów są istotne w procesie przetwarzania i klasyfikowania sygnału przez narząd słuchu. Powinny one także dostarczyć danych liczbowych dla celów projektowania zestawów.

Wyniki analizy teoretycznej i pomiarów psychoakustycznych stworzą podstawę do projektowania rozmieszczenia głośników, dającego przy danym typie zwrotnicy największy obszar odsłuchu.



## 2. PROMIENIOWANIE DŹWIĘKU PRZEZ ZESTAWY GŁOŚNIKOWE

Łączenie głośników w zestawy głośnikowe pozwala uzyskać lepsze właściwości urządzenia nagłaśniającego, niż mógłby dać najlepszy nawet pojedynczy głośnik. Osiąga się to jednak kosztem zmian parametrów urządzenia - zmienia się jego charakterystyka kierunkowości, może się również zmienić charakterystyka mocowa. Zmiana charakterystyki kierunkowości zestawów może być przyczyną zmiany parametrów stereofonicznego układu odsłuchowego, decydujących o lokalizacji odtwarzanego obrazu dźwiękowego.

Podstawę do oceny wpływu parametrów konstrukcyjnych zestawu głośnikowego na jego właściwości eksploatacyjne daje przedstawiona poniżej analiza charakterystyki kierunkowości zestawu, jego charakterystyki mocowej oraz wskaźników lokalizacyjnych występujących przy odtwarzaniu stereofonicznym.

### 2.1. Charakterystyka kierunkowości zestawu dwudrożnego

Obecnie stosuje się zestawy dwu-, trzy- i czterodrożne. Do analizy wybrano zestaw dwudrożny, uwidaczniający zasadnicze właściwości zestawów wielodrożnych, a jednocześnie pozwalający otrzymać czytelne zależności określające jego parametry. Wyniki uzyskane dla zestawów dwudrożnych można stosunkowo łatwo rozszerzyć dla przypadku większej ilości głośników w zestawie. Wynika to z faktu, iż poszczególne częstotliwości rozdziału różnią się od siebie na tyle, że każdą parę głośników przenoszących sąsiadujące ze sobą części pasma akustycznego można rozważać oddzielnie.

### 2.1.1. Równania dla dwóch tłoków płaskich w nieskończonej odgradzie

Opis pola akustycznego dla dowolnego rozkładu źródeł daje całka Helmholtza-Huygensa [56]. Jeżeli źródło jest płaskie i znajduje się w nieskończenie dużej, płaskiej odgradzie, to ciśnienie akustyczne w polu dalekim można wyznaczyć z wzoru całkowego Huygensa-Rayleigha [56].

$$\underline{P} = \frac{j k \rho c}{2 \pi} \int_S \frac{\underline{v}_n(x, y) e^{-jkr}}{r} dG, \quad (2.1)$$

przy czym:

- $\underline{v}_n(x, y)$  jest rozkładem na powierzchni  $S$  prędkości źródła, skierowanej prostopadle do tej powierzchni,
- $S$  jest powierzchnią źródła,
- $r$  jest odległością pomiędzy elementem  $dG$  powierzchni  $S$  a punktem obserwacji.

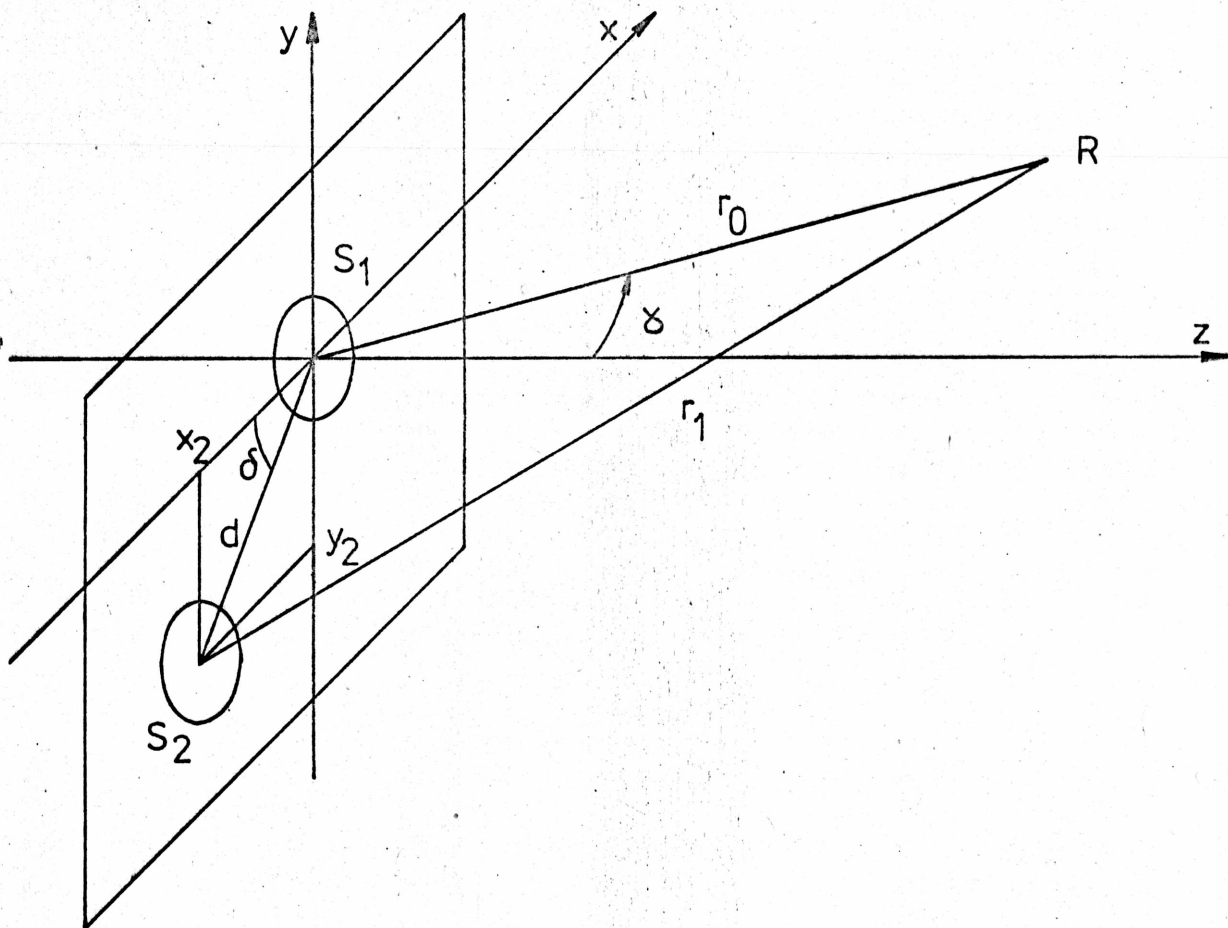
Traktując zestaw głośnikowy jako układ dwóch tłoków kołowych /to i inne przyjęte założenia zostały omówione w rozdziale 2.1.2/, ciśnienie w punkcie obserwacji  $R$  można wyrazić jako sumę całek po powierzchniach obu tłoków  $S_1$  i  $S_2$  /rys.2.1/:

$$\begin{aligned} \underline{P}(R) &= \frac{j k \rho c}{2 \pi} \left[ \int_{S_1} \frac{\underline{v}_1 e^{-jkr}}{r} dG_1 + \int_{S_2} \frac{\underline{v}_2 e^{-jkr}}{r} dG_2 \right] = \\ &= P_1(R) + P_2(R), \end{aligned} \quad (2.2)$$

przy czym:

$\underline{v}_1$  i  $\underline{v}_2$  są prędkościami tłoków.  
Ciśnienie  $\underline{P}_1(R)$  wyraża się wzorem [80]

$$\underline{P}_1(R) = \frac{j k \rho c U_1}{\pi r_0} \frac{J_1(k a_1 \sin \gamma)}{k a_1 \sin \gamma} e^{-jkr_0} \quad (2.3)$$



Rys.2.1. Geometria układu dwóch źródeł kołowych.

przy czym  $\delta$  jest kątem pomiędzy odcinkiem  $r_0$  a osią  $z$ ,  $a_1$  promieniem tła, natomiast

$$\underline{u} = \sqrt{a^2} \underline{v} \quad (2.4)$$

prędkością objętościową tła.

Stosując przybliżenie Fraunhofera zakłada się, że odległość punktu obserwacji od układu jest tak duża w porównaniu z wymiarami układu źródeł, że odległość  $r_1$  jest większa od  $r_0$  o rzut odcinka  $d$  na kierunek  $r_0$

$$r_1 = r_0 + d \cos(r_0, d) = r_0 + x_2 \cos(r_0, x) + y_2 \cos(r_0, y), \quad (2.5)$$

jednocześnie amplitudy ciśnienia w odległości  $r_0$  i  $r_1$  są sobie równe ( $\frac{1}{r_0} = \frac{1}{r_1}$ ), zatem ciśnienie  $\underline{p}_2(R)$  wynosi

$$\underline{P}_2(R) = \frac{jk\zeta c \underline{U}_2}{\mathbb{J} r_0} \frac{J_1(ka_2 \sin \gamma)}{ka_2 \sin \gamma} e^{-jk [r_0 + x_2 \cos(r_0, x) + y_2 \cos(r_0, y)]} \quad (2.6)$$

Na osi głównej zestawu (osi Oz) zachodzi:

$$\begin{aligned} \gamma &= 0, \\ \cos(r_0, x) &= 0, \\ \cos(r_0, y) &= 0, \end{aligned} \quad (2.7)$$

czyli

$$\underline{P}_1(Z) = \frac{jk\zeta c \underline{U}_1}{2\mathbb{J} r_0} e^{-jkr_0}, \quad (2.8)$$

$$\underline{P}_2(Z) = \frac{jk\zeta c \underline{U}_2}{2\mathbb{J} r_0} e^{-jkr_0} \quad (2.9)$$

Zespolona charakterystyka kierunkowości układu jest określona jako stosunek ciśnienia wytwarzanego w dowolnym kierunku, do ciśnienia na osi zestawu:

$$\underline{D} = \frac{\underline{P}(R)}{\underline{P}(Z)} = \frac{\underline{P}_1(R) + \underline{P}_2(R)}{\underline{P}_1(Z) + \underline{P}_2(Z)} \quad (2.10)$$

Wstawiając do wzoru (2.10) zależności (2.3), (2.6) (2.8) i (2.9) otrzymuje się wyrażenie na charakterystykę kierunkowości układu dwóch tłoków kołowych

$$\underline{D} = 2 \frac{\frac{J_1(ka_1 \sin \gamma)}{ka_1 \sin \gamma} \underline{U}_1 e^{-jk [x_2 \cos(r_0, x) + y_2 \cos(r_0, y)]} + \frac{J_1(ka_2 \sin \gamma)}{ka_2 \sin \gamma} \underline{U}_2}{\underline{U}_1 + \underline{U}_2}, \quad (2.11)$$

w którym kąt  $\gamma$  i kosinusy kierunkowe wyrażone we współrzędnych kulistych mają postać:

$$\gamma = \arctg \left( \frac{\operatorname{tg} \psi}{\sin \theta} \right) , \quad (2.12)$$

$$\cos (r_{0,x}) = \cos \arctg \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \theta + \operatorname{ctg}^2 \psi} , \quad (2.13)$$

$$\cos (r_{0,y}) = \cos \arctg \left( \frac{\operatorname{tg} \theta}{\sin \psi} \right) , \quad (2.14)$$

Współrzędne źródła  $S_2$  wyrażone we współrzędnych biegunowych płaszczyzny  $xy$  są równe:

$$x_2 = d \cos \delta , \quad (2.15)$$

$$y_2 = d \sin \delta , \quad (2.16)$$

W płaszczyźnie  $xz$  zachodzi

$$\theta = \frac{\pi}{2} , \quad (2.17)$$

charakterystyka kierunkowości ma więc postać

$$\underline{D} = 2 \frac{\frac{J_1(ka_1 \sin \psi)}{ka_1 \sin \psi} \underline{U}_1 e^{-jkd \cos \delta \sin \psi} + \frac{J_1(ka_2 \sin \psi)}{ka_2 \sin \psi} \underline{U}_2}{\underline{U}_1 + \underline{U}_2} \quad (2.18)$$

Prędkości objętościowe tłoków zależą od sygnału doprowadzonego do zestawu. Jeżeli transformata Fouriera sygnału doprowadzonego do zestawu jest równa  $\underline{x}(j\omega)$ , to prędkości objętościowe membran wynoszą:

$$\underline{U}_1(j\omega) = \underline{x}(j\omega) \underline{F}_D(j\omega) \underline{I}_N(j\omega) , \quad (2.19)$$

$$\underline{U}_2(j\omega) = \underline{x}(j\omega) \underline{F}_G(j\omega) \underline{I}_W(j\omega) .$$

przy czym:

$\underline{F}_D(j\omega)$  i  $\underline{F}_G(j\omega)$  są odpowiednio transmitancjami filtru dolnoprzepustowego i górnoprzepustowego zwrotnicy głośnikowej,

$\underline{I}_N(j\omega)$  i  $\underline{I}_W(j\omega)$  oznaczają transmitancje prędkościowo-napięciowe głośników niskotonowego i wysokotonowego.

Jeżeli częstotliwości graniczne filtrów są dużo większe od częstotliwości rezonansu mechanicznego głośników, to dla użytecznego zakresu pracy głośników można przyjąć

$$\underline{I}_N(j\omega) = \underline{I}_W(j\omega) = \underline{I}(j\omega). \quad (2.20)$$

Charakterystyka kierunkowości zestawu przyjmuje teraz postać:

$$\underline{D}=2 \frac{\frac{J_1(ka_1 \sin\psi)}{ka_1 \sin\psi} \underline{F}_D(j\omega) e^{-jkd \cos\delta \sin\psi} + \frac{J_1(ka_2 \sin\psi)}{ka_2 \sin\psi} \underline{F}_G(j\omega)}{\underline{F}_D(j\omega) + \underline{F}_G(j\omega)} \quad (2.21)$$

Dla małych wartości argumentu funkcji Bessela

$$ka \sin\psi \ll 1, \quad \frac{J_1(ka \sin\psi)}{ka \sin\psi} = \frac{1}{2} \quad (2.22)$$

Zatem charakterystyka kierunkowości w pobliżu osi zestawu wyraża się wzorem

$$\underline{D} = \frac{\underline{F}_D(j\omega) e^{-jkd \cos\delta \sin\psi} + \underline{F}_G(j\omega)}{\underline{F}_D(j\omega) + \underline{F}_G(j\omega)} \quad (2.23)$$

Funkcje transmitancji najczęściej stosowanych w zwrotnicach filtrów Butterwortha można zapisać następująco: dla filtru dolnoprzepustowego p-tego rzędu

$$\underline{F}_D(j\omega_n) = \frac{1}{\underline{M}_p(j\omega_n)} \quad (2.24)$$

dla filtru górnoprzepustowego p-tego rzędu

$$\underline{F}_G(j\omega_n) = \frac{(j\omega_n)^p}{\underline{M}_p(j\omega_n)} \quad (2.25)$$

przy czym:

$$\omega_n = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (2.26)$$

jest pulsacją znormalizowaną do pulsacji rozdziału zwrotnicy  $\omega_0$ ,

$\underline{M}_p(j\omega_n)$  jest wielomianem p-tego stopnia.

Wstawiając wzory (2.24) i (2.25) do (2.23) oraz wprowadzając do wyrażenia przesuwność jednostkową

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (2.27)$$

pulsację znormalizowaną  $\omega_n$  otrzymuje się

$$\underline{D} = \frac{e^{-j \frac{\omega_0^d}{c} \omega_n \cos \delta \sin \psi} + (j\omega_n)^p}{1 + (j\omega_n)^p} \quad (2.28)$$

Amplitudowa charakterystyka kierunkowości zestawu, będąca modułem zespolonej charakterystyki kierunkowości ma postać następującą:

dla filtrów rzędu nieparzystego

$$D(\omega_n, \psi) = |\underline{D}| = \left[ 1 - \frac{(-1)^{p-1} 2\omega_n^p \sin \frac{\omega_n \omega_0^d}{c} \cos \delta \sin \psi}{1 + \omega_n^{2p}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad p=1,3,\dots \quad (2.29)$$

dla filtrów rzędu parzystego



$$D(\omega_n, \psi) = |\underline{D}| = \left[ 1 - \frac{(-1)^{\frac{p-2}{2}} 2 \omega_n^p \cos \frac{\omega_n \omega_0^d}{c} \cos \delta \sin \psi}{1 + \omega_n^{2p}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad p=2,4,\dots \quad (2.30)$$

Równania (2.29) i (2.30) wyprowadzono przy założeniu, że głośniki są zasilane w jednakowej fazie. Jeżeli fazy prędkości membran są przeciwne, to w jednym z wzorów (2.19) występuje znak minus i w rezultacie w równaniach (2.29) i (2.30) zamiast różnicy w nawiasie kwadratowym pojawia się suma.

Argumentem funkcji trygonometrycznych w równaniach charakterystyk kierunkowości jest różnica przesunięć fazowych sygnałów na drodze równej odległości od poszczególnych głośników do punktu obserwacji

$$\psi = kd \cos \delta \sin \psi = \omega \tau \quad (2.31)$$

przy czym  $\tau$  jest opóźnieniem czasowym odpowiadającym tej różnicy odległości

$$\tau = \frac{d}{c} \cos \delta \sin \psi \quad (2.32)$$

Wprowadzając w równaniu (2.31) pulsację znormalizowaną  $\omega_n$  (2.26) oraz opóźnienie znormalizowane do okresu drgań  $T_0$  przy częstotliwości rozdzielą  $\omega_0$  z czynnikiem  $2\pi$

$$t_n = \frac{2\pi\tau}{T_0} \quad (2.33)$$

otrzymujemy

$$\psi = \omega_n t_n, \quad (2.34)$$

$$t_n = \frac{\omega_0^d}{c} \cos \delta \sin \psi. \quad (2.35)$$

W przypadku zestawów głośnikowych zwykle występują różnice w wymiarach geometrycznych głośników przeznaczonych do pracy w różnych zakresach częstotliwości. Skutkiem różnych wysokoś-



ci stożka membrany jest to, że "środki promieniowania" /zastępcze źródła punktowe/ poszczególnych głośników nie leżą w jednakowej odległości od płaszczyzny płyty czołowej zestawu. W rezultacie występuje skręcenie głównej osi promieniowania zestawu. Zgodnie z oznaczeniami na rys. 2.2 kąt, o który skręcony jest rzut głównej osi promieniowania na płaszczyznę  $xz$  jest równy

$$\alpha = \text{arc tg } \frac{z_2}{x_2} \quad (2.36)$$

przy czym  $z_2$  jest przesunięciem źródła  $S_2$  w głąb obudowy,  $x_2$  jest rzutem odległości  $d$  pomiędzy głośnikami na oś  $Ox$ . Na rysunku  $z_2$  a więc i kąt  $\alpha$  mają wartość ujemną.

W wyniku wystąpienia przesunięcia  $z_2$  przesunięcie fazowe  $\psi$  jest równe

$$\psi = kx_2 \cos \delta \sin(\psi - \alpha) = k d (\cos \delta \sin \psi - z_2 \cos \psi). \quad (2.37)$$

Zatem opóźnienie  $t_n$  wyraża się wzorem

$$t_n = \frac{(d \cos \delta \sin \psi - z_2 \cos \psi) \omega_0}{c} \quad (2.38)$$

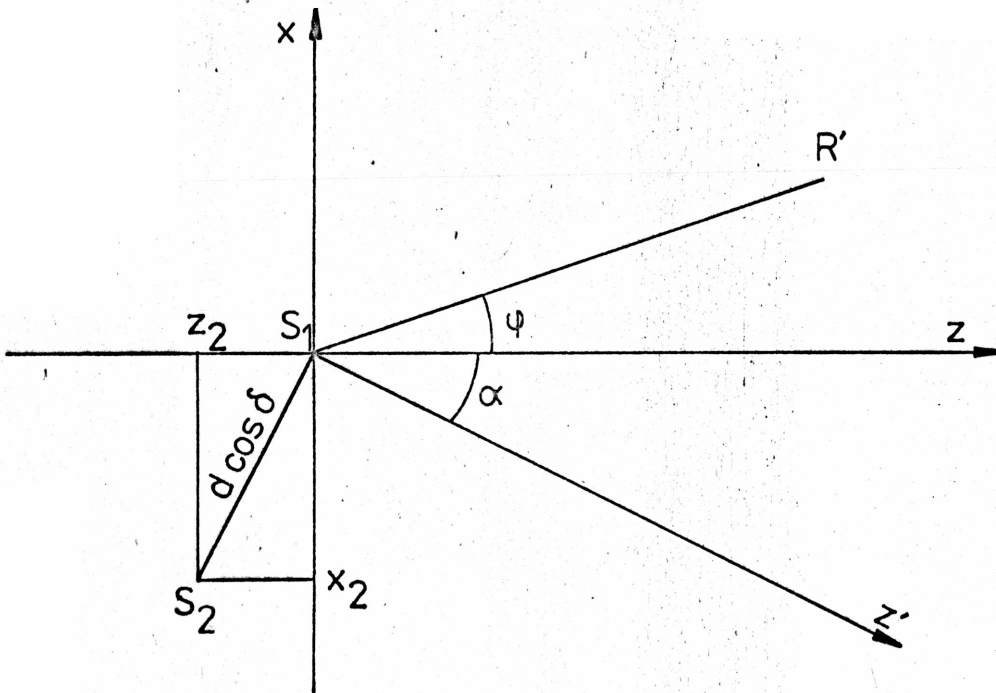
Charakterystyki zestawów uzależnione od różnicy czasów dojścia sygnałów od poszczególnych głośników mają postać

$$D = \left[ 1 - \frac{(-1)^{\frac{p-1}{2}} 2 \omega_n^p \sin \omega_n t_n}{1 + \omega_n^{2p}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad p=1,3,\dots \quad (2.39)$$

oraz

$$D = \left[ 1 - \frac{(-1)^{\frac{p-2}{2}} 2 \omega_n^p \cos \omega_n t_n}{1 + \omega_n^{2p}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad p=2,4,\dots \quad (2.40)$$

Zależności powyższe opisują charakterystyki amplitudowe zestawów w zależności od wartości parametru  $t_n$ , który



Rys.2.2. Obrót głównej osi promieniowania w wyniku umieszczenia jednego z głośników poza płaszczyzną płyty czołowej zestawu:  $Oz$  - oś geometryczna,  $Oz'$  - oś promieniowania.

z kolei zależy od kąta  $\psi$ . Analogicznie można wyprowadzić równania charakterystyk fazowych lub opóźnieniowych znajdując z zależności (2.18) funkcję  $\arg \underline{D}(\omega_n)$  /charakterystyka fazowa/ i następnie różniczkując ją po pulsacji, zgodnie z definicją opóźnienia grupowego (opóźności)

$$\tau_{gr} = \frac{-d(\arg D)}{d\omega} \quad (2.41)$$

Amplitudowe i fazowe charakterystyki zestawów w funkcji opóźnienia  $t_n$  dla zwrotnic typu Butterwortha pierwszych trzech rzędów dane są w tabeli 2.1. Charakterystyki są oznaczone według klucza, określającego rząd filtra, sposób przyłączenia głośników oraz wskazującego, która część widma sygnału jest opóźniona. Na przykład symbol  $D1(+)$  oznacza filtry pierwszego rzędu (1), głośniki przyłączone w jednakowej fazie (+) i opóźnioną małowycięstotliwościową

część widma sygnału (D), zaś  $G2(-)$  oznacza filtry drugiego rzędu (2) połączenie w przeciwnej fazie (-) i opóźnioną duzo- częstotliwościową część widma sygnału (G) .

Analizując charakterystyki amplitudowe i opóźnieniowe zestawów ze zwrotnicami Butterwortha można stwierdzić, że w przypadku zwrotnicy danego rzędu wśród czterech charakterystyk amplitudowych  $D_{D(+)}$  ,  $D_{D(-)}$  ,  $D_{G(+)}$  ,  $D_{G(-)}$  występują dwie pary charakterystyk identycznych. W przypadku rzędu nieparzystego zachodzi

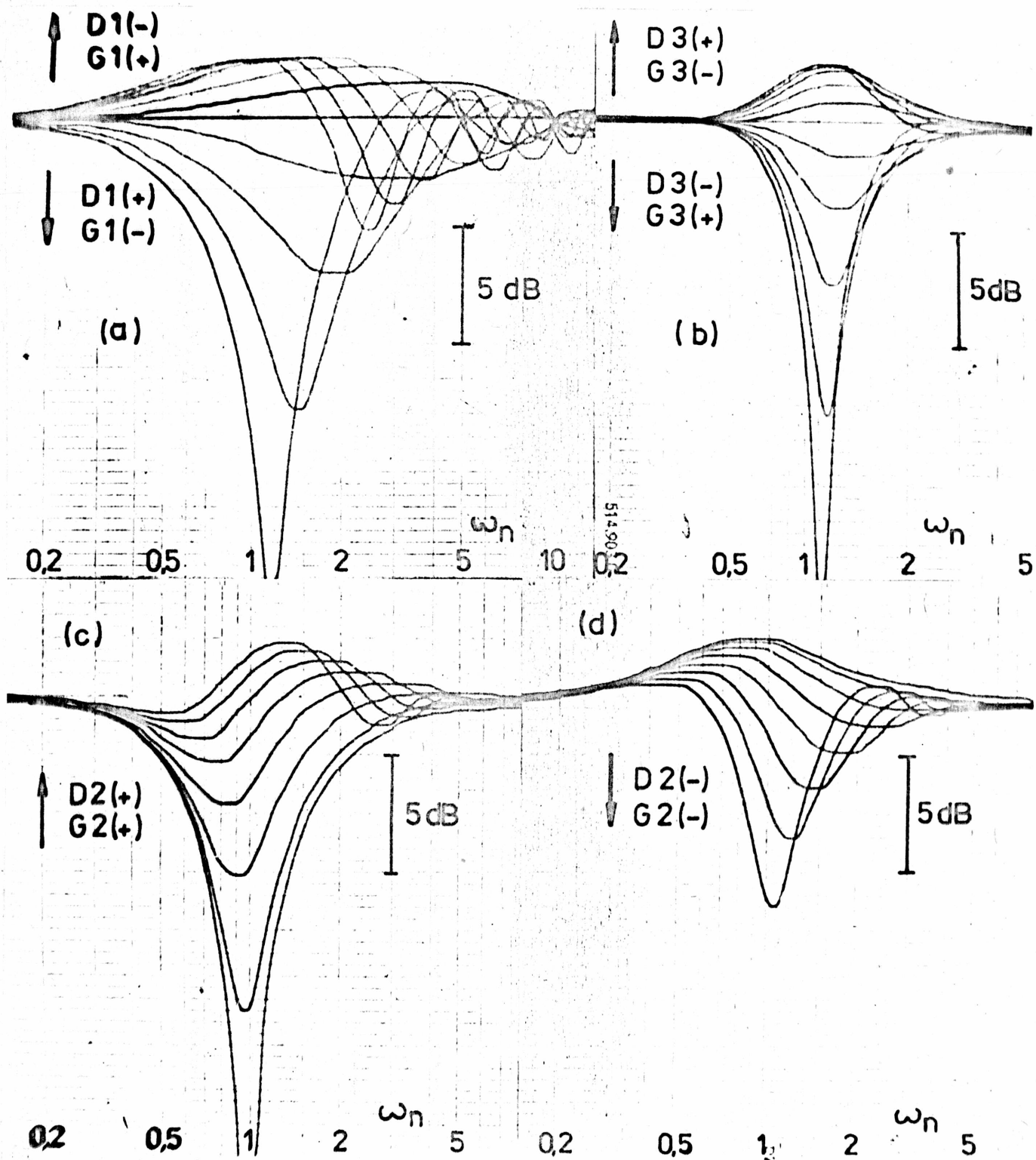
$$\begin{aligned} D_{D(+)} &= D_{G(-)} \\ D_{D(-)} &= D_{G(+)} \end{aligned} \quad (2.42)$$

a w przypadku filtrów rzędów parzystych jest

$$\begin{aligned} D_{D(+)} &= D_{G(+)} \\ D_{D(-)} &= D_{G(-)} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Charakterystyka opóźnienia grupowego jest jednak w każdym przypadku inna.

Na rysunku 2.3 przedstawione są rodziny charakterystyk (2.39) dla różnych wartości  $t_n$ .



Rys.2.3. Rodziny charakterystyk amplitudowych danych wzorami (2.39) i (2.40) z opóźnieniem  $t_n$  jako parametrem: a/  $p=1$ , b/  $p=3$ , c/  $p=2$  połączenie w zgodnej fazie d/  $p=2$  połączenie w fazie przeciwnej. Strzałki oznaczają kierunek zmian charakterystyk,  $t_n$  zwiększa się od zera ze skokiem  $\Delta t_n = 2\pi \cdot 0,05$ .

### 2.1.2. Dyskusja założeń

Przy wyprowadzaniu równań charakterystyk kierunkowości zestawów przyjęto szereg założeń, co pozwoliło uzyskać przejrzyste w formie zależności. Konsekwencją wprowadzania założeń może być ograniczenie zakresu stosowalności modelu matematycznego w odniesieniu do obiektu fizycznego lub jego nieadekwatność w sensie podstawowych właściwości obiektu. Dlatego też przyjęte założenia zostaną niżej szczegółowo omówione.

#### Obudowa głośnikowa jako nieskończona odgroda

Założenie, że źródło znajduje się w nieskończonej odgradzie jest równoważne żądaniu, aby w polu akustycznym zestawu nie występowała składowa związana z promieniowaniem tylnej strony membrany głośnika oraz aby na powierzchni, na której są umieszczone źródła, nie występowały efekty dyfrakcyjne.

Oddzielenie przestrzenne pól wytwarzanych przez przednią i tylną stronę membrany jest podstawowym zadaniem obudowy głośnikowej, jest ono praktycznie spełnione nawet w przypadku obudów otwartych w zakresie częstotliwości powyżej około 300 Hz [43] .

Skończone wymiary płyty czołowej zestawu są przyczyną uginania się fali na krawędziach obudowy i, w rezultacie, nierównomierności charakterystyki skuteczności zestawu. Jeżeli głośniki są rozmieszczone w płycie czołowej niesymetrycznie, fale docierające od różnych punktów krawędzi płyty czołowej do punktu obserwacji mogą kompensować się wzajemnie i w efekcie nie występuje nierównomierność charakterystyki [41].

#### Ograniczenie analizy do pola dalekiego

Przybliżenie Fraunhofera polega na pominięciu wyrazów wyższego rzędu niż pierwszy w wyrażeniu (2.5) . Jest to rów-

Tabela 2.1

Amplitudowe i opóźnieniowe charakterystyki częstotliwościowe zestawów ze zwrotnicami Butterwortha. Oznaczenie zwrotnicy np. D1(+) oznacza filtry pierwszego rzędu, przyłączone w zgodnej fazie, z opóźnioną małowyczościową częścią widma sygnału, zaś G2(-)-filtry drugiego rzędu przyłączone w fazie przeciwnej z opóźnioną dużowyczościową częścią widma sygnału.

| Typ zwrotnicy | Moduł transmitancji  | Opóźnienie grupowe   |
|---------------|--|--|
| D1(+)         | $\left(1 - \frac{2\omega_n}{1+\omega_n^2} \sin\omega_n t_n\right)^{1/2}$   | $\frac{1}{1+\omega_n^2} + \frac{t_n - \cos\omega_n t_n - \omega_n t_n - \omega_n t_n \sin\omega_n t_n}{1 - 2\omega_n \sin\omega_n t_n + \omega_n^2}$                           |
| G1(-)         | - "  | $\frac{1}{1+\omega_n^2} + \frac{\omega_n^2 t_n + \cos\omega_n t_n - \omega_n t_n \sin\omega_n t_n}{1 - 2\omega_n \sin\omega_n t_n + \omega_n^2}$                               |
| D1(-)         | $\left(1 + \frac{2\omega_n}{1+\omega_n^2} \sin\omega_n t_n\right)^{1/2}$   | $\frac{1}{1+\omega_n^2} + \frac{t_n + \cos\omega_n t_n + \omega_n t_n \sin\omega_n t_n}{1 + 2\omega_n \sin\omega_n t_n + \omega_n^2}$  |
| G1(+)         | - "  | $\frac{1}{1+\omega_n^2} + \frac{\omega_n^2 t_n - \cos\omega_n t_n + \omega_n t_n \sin\omega_n t_n}{1 + 2\omega_n \sin\omega_n t_n + \omega_n^2}$                               |
| D2(+)         | $\left(1 - \frac{2\omega_n^2}{1+\omega_n^4} \cos\omega_n t_n\right)^{1/2}$ | $\sqrt{2} \frac{1+\omega_n^2}{1+\omega_n^4} + \frac{t_n + 2\omega_n \sin\omega_n t_n - \omega_n^2 \omega t_n \cos\omega_n t_n}{1 - 2\omega_n^2 \cos\omega_n t_n + \omega_n^4}$ |

| Typ zwrotnicy | Moduł transmitancji   | Opóźnienie grupowe   |
|---------------|---|--|
| G2(+)         | $\left(1 - \frac{2\omega_n^2}{1+\omega_n^4} \cos \omega_n t_n\right)^{1/2}$ | $\sqrt{2} \frac{1+\omega_n^2}{1+\omega_n^4} + \frac{\omega_n^4 t_n - 2\omega_n \sin \omega_n t_n - \omega_n^2 t_n \cos \omega_n t_n}{1-2\omega_n^2 \cos \omega_n t_n + \omega_n^4}$        |
| D2(-)         | $\left(1 + \frac{2\omega_n^2}{1+\omega_n^4} \cos \omega_n t_n\right)^{1/2}$ | $\sqrt{2} \frac{1+\omega_n^2}{1+\omega_n^4} + \frac{t_n - 2\omega_n \sin \omega_n t_n + \omega_n^2 t_n \cos \omega_n t_n}{1+2\omega_n^2 \cos \omega_n t_n + \omega_n^4}$                   |
| G2(-)         | --  | $\sqrt{2} \frac{1+\omega_n^2}{1+\omega_n^4} + \frac{\omega_n^4 t_n + 2\omega_n \sin \omega_n t_n + \omega_n^2 t_n \cos \omega_n t_n}{1 + 2\omega_n^2 \cos \omega_n t_n + \omega_n^4}$      |
| D3(+)         | $\left(1 + \frac{2\omega_n^3}{1+\omega_n^6} \sin \omega_n t_n\right)^{1/2}$ | $\frac{2+\omega_n^2+2\omega_n^4}{1+\omega_n^6} + \frac{t_n + 3\omega_n^2 \cos \omega_n t_n + \omega_n^3 t_n \sin \omega_n t_n}{1 + 2\omega_n^3 \sin \omega_n t_n + \omega_n^6}$            |
| G3(-)         | --  | $\frac{2+\omega_n^2+2\omega_n^4}{1+\omega_n^6} + \frac{\omega_n^6 t_n - 3\omega_n^2 \cos \omega_n t_n + \omega_n^3 t_n \sin \omega_n t_n}{1 + 2\omega_n^3 \sin \omega_n t_n + \omega_n^6}$ |
| D3(-)         | $\left(1 - \frac{2\omega_n^3}{1+\omega_n^6} \sin \omega_n t_n\right)^{1/2}$ | $\frac{2+\omega_n^2+2\omega_n^4}{1+\omega_n^6} + \frac{t_n - 3\omega_n^2 \cos \omega_n t_n - \omega_n^3 t_n \sin \omega_n t_n}{1 - 2\omega_n^3 \sin \omega_n t_n + \omega_n^6}$            |
| G3(+)         | --  | $\frac{2+\omega_n^2+2\omega_n^4}{1+\omega_n^6} + \frac{\omega_n^6 t_n + 3\omega_n^2 \cos \omega_n t_n - \omega_n^3 t_n \sin \omega_n t_n}{1 - 2\omega_n^3 \sin \omega_n t_n + \omega_n^6}$ |



noważne wymaganiu aby

$$\frac{d^2}{r_0^2} \ll 1 \quad (2.44)$$

Jeżeli błąd oceny odległości nie ma przekraczać 10%, wystarczy, aby

$$\frac{d}{r_0} = \frac{1}{3} \quad (2.45)$$

Przy odległości punktu obserwacji wynoszącej 1.5 m warunek (2.45) jest spełniony nawet dla dużych zestawów ( $d = 0,5$  m).

### Membrana głośnika jako tłok płaski

Potraktowanie membrany głośnika jako płaskiego tłoka pozwala uzyskać charakterystykę kierunkowości głośnika w stosunkowo prostej postaci analitycznej, wyrażającej się ilorazem funkcji  $\underline{p}(R)$  i  $\underline{p}(Z)$  danych wzorami (2.3) i (2.8). Znane są zależności na charakterystykę kierunkowości drgającego stożka sztywnego [19,21], lecz ich całkowita postać czyni je niepraktycznymi do analizy. Obliczenia numeryczne z wzoru całkowego wykazały [19], że główny listek charakterystyki nie wykazuje tendencji do stałego zwężania się ze wzrostem częstotliwości jak to jest w przypadku charakterystyki danej wzorem (2.3). W tym kontekście usprawiedliwione wydaje się przyjęcie dla obszaru zbliżonego do osi głównej przybliżenia (2.22).

### Prowadzenie analizy dla płaszczyzny xz

Promieniowanie zestawu w płaszczyźnie poziomej jest najbardziej interesujące z punktu widzenia jego eksploatacji. Przyjęcie warunku (2.17) nie ogranicza zakresu analizy, gdyż we wzorach (2.39) i (2.40) można wstawić za  $t_n$  dowolne opóź-



nienie sygnałów docierających do punktu obserwacji od jednego głośnika w stosunku do drugiego głośnika.

### Wybór transmitancji filtrów

Podstawowym kryterium doboru filtrów do zwrotnic głośnikowych jest charakterystyka częstotliwościowa amplitudy i fazy sumy transmitancji filtrów. W przypadku zwrotnic aktywnych istnieje wiele sposobów realizacji warunku, aby suma transmitancji była równa jedności [67].

$$\underline{F}_D(j\omega) + \underline{F}_G(j\omega) = 1 \quad (2.46)$$

W przypadku zwrotnic złożonych z elementów biernych przy projektowaniu konieczne jest założenie wartości impedancji obciążającej filtr. Jeżeli założyć, że filtr jest obciążony rezystorem o wartości równej znamionowej impedancji głośnika to prowadzi to do projektowania filtrów o charakterystykach Butterwortha [67]. Dlatego też filtry Butterwortha są najpowszechniej stosowane w zwrotnicach głośnikowych, pomimo, że warunek (2.46) jest spełniony tylko w przypadku filtrów I rzędu, a w przypadku filtrów III rzędu równy jedności jest jedynie moduł sumy transmitancji.

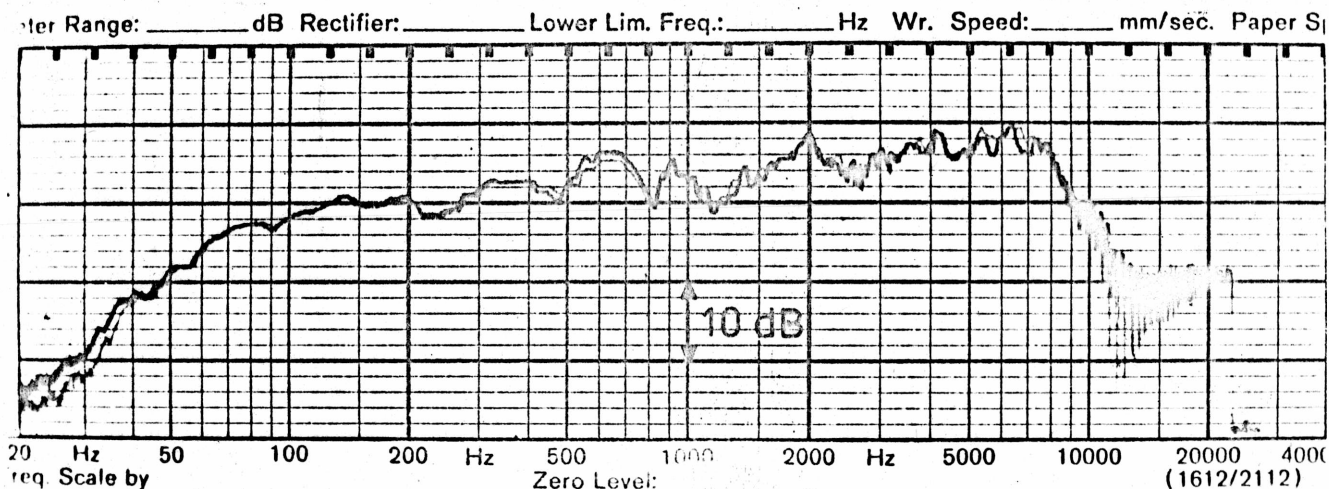
### Jednakowe transmitancje prędkościowo-napięciowe głośników

W zakresie częstotliwości powyżej rezonansu mechanicznego, a poniżej częstotliwości granicznej zakresu tłokowego membrany, transmitancja prędkościowo-napięciowa głośnika nie wykazuje nierównomierności [33]. Głośniki są jednak zwykle wykorzystywane również w zakresie częstotliwości powyżej zakresu tłokowego. Konsekwencją tego są nierównomierności charakterystyki amplitudowej i fazowej transmitancji, zależne od rodzaju głośnika. W dobrych, współcześnie produ-

kowanych głośnikach nierównomierności te są niewielkie.

W celu oceny efektów nierównomierności przeprowadzono pomiary charakterystyk skuteczności zestawu głośnikowego, w którym jako głośnik niskotonowy i wysokotonowy wykorzystano głośniki szerokopasmowe typu GDN 16/10 o charakterystykach różniących się od siebie wskutek rozrzutów technologicznych (rys. 2.4). Mierzono charakterystykę zestawu dla  $t_n = 0$  i wybranego opóźnienia  $t_n$  i porównywano różnicę tych charakterystyk z różnicą wyznaczoną teoretycznie. Pomiary wykonano dla częstotliwości rozdziału  $f_0 = 1000$  Hz, zwrotnic Butterwortha o nachyleniach 6 dB/okt i 12 dB/okt. Głośniki przyłączone w fazie /zwrotnice I rzędu/ i w przeciwfazie /zwrotnice I i II rzędu/. Wprowadzone opóźnienia wynosiły  $\pm 100$   $\mu$ s,  $\pm 200$   $\mu$ s. Porównanie przeprowadzono dla wybranych równomiernie na skali logarytmicznej 15 wartości częstotliwości z zakresu od 200 Hz do 5000 Hz. Wartość średnia różnic pomiędzy nierównomiernościami charakterystyk obliczonymi i zmierzonymi była bliska zeru /np. dla  $\tau = 100$   $\mu$ s, nachylenia 6 dB/okt i głośników połączonych w fazie, co daje maksymalną nierównomierność wynoszącą 7 dB, wartość średnia różnicy wynosiła 0,08 dB/. Odchylenia standardowe zależały od wprowadzonej nierównomierności i wynosiły od około 0.25 dB dla nierównomierności maksymalnej 4 dB do 1.5 dB dla nierównomierności maksymalnej równej 13 dB. Odpowiednie przedziały ufności dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  były równe  $L = \pm 0,9$  dB i  $L = \pm 0,18$  dB. Wydaje się, że tak małe błędy /na które składały się również inne błędy pomiaru, jak wpływ komory bezpogłosowej, błąd odczytu, błąd ustawienia częstotliwości, itp./ uzasadniają stosowanie przedstawionej analizy do rzeczywistych głośników dobrej jakości.

W niektórych głośnikach, zwłaszcza niskotonowych, występuje wyraźny wpływ indukcyjności cewki drgającej. Transmitancja głośnika niskotonowego w zestawie odbiega wówczas od założonej, lecz jest to skutek błędnego zaprojektowania zwrotnicy, w którym nie uwzględniono tej indukcyjności [10].



Rys.2.4. Charakterystyki skuteczności stosowanych w badaniach głośników GDN 16/10, zmierzone po umieszczeniu ich w obudowie o pojemności  $20^3 \text{ dm}^3$ .

Jeżeli stosunek transmitancji głośnika wysokotonowego i niskotonowego oznaczyć przez  $\underline{N}(j\omega)$

$$\underline{N}(j\omega) = \frac{I_w(j\omega)}{I_N j\omega} = N(\omega) e^{j\psi_N} \quad (2.47)$$

to charakterystykę kierunkowości zestawu z uwzględnieniem rozbieżności charakterystyk głośników można przedstawić w postaci

$$D = \left[ \frac{1 + \omega_n^{2p} N(\omega_n)^{2p} - (-1)^{\frac{p-1}{2}} 2\omega_n^p N(\omega)^p \sin(\omega_n t_n + \psi_N)}{1 + \omega_n^{2p} N(\omega)^{2p} - (-1)^{\frac{p-1}{2}} 2\omega_n^p N(\omega)^p \sin \psi_N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.48)$$

dla  $p=1,3,\dots$

oraz

$$D = \left[ \frac{1 + \omega_n^{2p} N(\omega)^{2p} - (-1)^{\frac{p-2}{2}} 2\omega_n^p N(\omega)^p \cos(\omega_n t_n + \psi_N)}{1 + \omega_n^{2p} N(\omega)^{2p} - (-1)^{\frac{p-2}{2}} 2\omega_n^p N(\omega)^p \sin \psi_N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.49)$$

dla  $p=2,4,\dots$

Ograniczenie analizy do małych wartości kąta  $\psi$

Ograniczenie to wiąże się z omówionym wcześniej założeniem dotyczącym traktowania membrany jako tłoka płaskiego. W obszarze leżącym w pobliżu osi głównej zestawu najczęściej

sadowi się słuchacz, który jest zainteresowany w jakości odtwarzanych sygnałów akustycznych. Ograniczenie to nie wydaje się drastyczne, jeśli uwzględnić, że przy dopuszczalnej wartości kąta  $\varphi$  wynoszącej przykładowo  $15^\circ$ , słuchacz znajdujący się w odległości 2 m od zestawu może przemieścić się w bok o 0.75 m i jeszcze pozostanie w obszarze  $\varphi \leq 15^\circ$ .

## 2.2. Charakterystyka mocowa zestawu dwudrożnego

Charakterystyki kierunkowości opisują pole akustyczne zestawu w przypadku, gdy promieniuje on w przestrzeń nieograniczoną. Zestawy użytkowe są jednak w zwykłych pomieszczeniach z odbijającymi granicami, do słuchacza docierają nie tylko fale biegnące bezpośrednio od głośników, lecz także fale odbite. W dodatku energia fal rozproszonych przewyższa zwykle energię fal bezpośrednich [1]. Dlatego też analizując promieniowanie dźwięku przez zestawy głośnikowe należy zbadać związek pomiędzy rozmieszczeniem głośników w zestawie a promieniowaną przez nich mocą.

Ogólny przypadek promieniowania mocy akustycznej przez układ tłoków zbadał Pritchard [44]. Promieniowanie mocy przez urządzenia wielogłośnikowe i kolumny dźwiękowe omówione jest w pracach [50] i [53]. Wymienione prace opisują promieniowanie układów, w których do każdego głośnika doprowadzony jest taki sam sygnał.

### 2.2.1. Impedancja promieniowania układu źródeł tłokowych

W układzie złożonym z  $N$  źródeł akustycznych, siłę działającą na  $n$ -te źródło, wywołaną oddziaływaniem wszystkich źródeł, można zapisać w formie [56]

$$\underline{F}_n = \sum_{m=1}^N Z_{nm} \underline{V}_m \quad (2.50)$$

przy czym  $\underline{V}_m$  jest prędkością  $m$ -tego źródła, impedancja  $Z_{nm}$  stanowi wzajemną impedancję promieniowania źródła  $m$ -tego

i n-tego gdy  $m \neq n$  lub własną impedancję promieniowania źródła n-tego gdy  $m = n$ .

W przypadku dwóch tłoków o promieniach  $a_1$  i  $a_2$  impedancje każdego z nich wynoszą

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{F}_1}{\underline{V}_1} = \underline{Z}_{11} + \frac{a_2^2}{a_1^2} \frac{\underline{V}_2}{\underline{V}_1} \underline{Z}_{12} \quad (2.51)$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{F}_2}{\underline{V}_2} = \underline{Z}_{22} + \frac{a_1^2}{a_2^2} \frac{\underline{V}_1}{\underline{V}_2} \underline{Z}_{21} \quad (2.52)$$

Jeżeli odległość pomiędzy tłokami umieszczonymi w nieskończonej odgradzie jest dużo większa od promienia każdego z nich

$$d \gg a_1, \quad d \gg a_2 \quad (2.53)$$

to impedancja tłoka pierwszego dla

$$(ka_1)^2 \ll 1 \quad (2.54)$$

jest równa [34]

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 = R_{11} \left[ 1 + \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \frac{\sin(kd + \psi)}{kd} \right] + \\ + jX_{11} \left[ 1 + \frac{3\pi a_1}{16d} \frac{\underline{U}_2 \cos(kd + \psi)}{\underline{U}_1 kd} \right] \end{aligned} \quad (2.55)$$

przy czym

$$R_{11} = \frac{\rho c}{2\pi} k^2 (\pi a_1^2)^2 \quad (2.56)$$

$$X_{11} = \frac{8}{3} \rho c ka_1^3 \quad (2.57)$$

stanowią rezystancję i reaktancję własną pojedynczego tłoka w nieskończonej odgradzie, kąt  $\psi$  oznacza opóźnienie fazy drgań tłoka drugiego w stosunku do pierwszego,  $\underline{u}$  jest prędkością objętościową tłoka (2.4) .

Wyrażenie na  $\underline{Z}_2$  można uzyskać zamieniając indeksy 1 i 2 oraz znak kąta  $\psi$  .

Założenia, które przyjął Jacobsen przy wyprowadzaniu równania (2.55) ograniczają zakres jego stosowalności do tłoków o wymiarach małych w porównaniu do długości fali, położonych w odległości dużo większej od  $\lambda$  . Na podstawie pracy Pritcharda można jednak wnioskować, że wzór (2.55) jest słuszny z dużą dokładnością nawet dla

$$ka = 1 \text{ i } kd = 2 \quad (2.58)$$

czyli w całym zakresie tłokowym i nawet przy stykających się głośnikach.

W celu określenia wzajemnej impedancji promieniowania dla  $ka > 1$  należałoby wyznaczyć ją z dokładnego wzoru [44] . Nie wdając się w związane z tym obliczenia, można dokonać porównania wzajemnej impedancji promieniowania dla małych i dużych wartości iloczynu  $ka$  .

Ciśnienie akustyczne wytwarzane przez kołowy tłok drgający w nieskończonej odgradzie jest równe

$$\underline{p} = j\omega\rho \frac{a^2 \underline{v}}{2r_0} \frac{J_1(ka \sin \psi)}{ka \sin \psi} e^{-jkr_0}, \quad r_0 \gg a, \quad (2.59)$$

przy czym  $r_0$  jest odległością od środka tłoka, kąt  $\psi$  jest mierzony od osi tłoka, a  $J_1$  jest funkcją Bessela pierwszego rzędu.

Ciśnienie w płaszczyźnie tłoka jest równe

$$\underline{p}(ka) = j\omega\rho \frac{a^2 \underline{v}}{2r_0} \frac{J_1(ka)}{ka} e^{-jkr_0} \quad (2.60)$$



Dla  $ka \ll 1$

$$P(ka \ll 1) = j\omega \frac{a^2 \underline{v}}{2r_0} e^{-jkr_0} \quad (2.61)$$

Stosunek ciśnień wytwarzanych przez dany tŁok na powierzchniach innych tŁoków wchodzących w skład układu źródeł dla małych i dużych częstotliwości wyraża się zależnością

$$\frac{P(ka)}{P(ka \ll 1)} = \frac{J_1(ka)}{ka} \quad (2.62)$$

Ponieważ funkcja  $J_1(ka)$  maleje asymptotycznie jak  $(2/\sqrt{\pi} ka)^{\frac{1}{2}}$  stosunek (2.62) maleje ze wzrostem iloczynu  $ka$ . Zatem przy zwiększaniu częstotliwości ciśnienie wywierane przez dany tŁok na powierzchnię innych tŁoków maleje, maleje więc także impedancja wzajemna. Można zatem stwierdzić, że jeżeli dla  $ka \ll 1$  odległość pomiędzy tŁokami jest na tyle duża, że wzajemna impedancja promieniowania jest pomijalna, będzie ona również pomijalna dla  $ka > 1$ .

### 2.2.2. Moc promieniowana przez układ dwóch źródeł

Moc pozorną promieniowaną przez tŁok, poruszający się z prędkością  $\underline{v}$ , jest równa

$$\underline{S} = N + jQ = R|\underline{v}|^2 + jX|\underline{v}|^2 \quad (2.63)$$

przy czym  $N$  jest mocą czynną promieniowaną w postaci fali akustycznej,  $Q$  mocą bierną, fluktuującą pomiędzy źródłem i jego bezpośrednim otoczeniem. Moc czynną, promieniowaną przez układ dwóch tŁoków w zakresie

$$ka_1 \ll 1, \quad ka_2 \ll 1 \quad (2.64)$$

można wyrazić wykorzystując wzory (2.55) i (2.56)

$$N = R_1 |V_1|^2 + R_2 |V_2|^2 = \frac{\rho_c k^2}{2\mathcal{J}} \left[ |U_1|^2 + |U_2|^2 + 2|U_1||U_2| \frac{\sin kd}{kd} \cos \Psi \right] \quad (2.65)$$

Dwa pierwsze składniki we wzorze (2.65) przedstawiają udział własny poszczególnych tłoków<sup>w</sup> promieniowanej mocy. Składnik trzeci wyraża moc promieniowaną wskutek wzajemnych oddziaływań pomiędzy tłokami.

Jeżeli prędkości objętościowe są równe, to ponieważ

$$\lim_{kd \rightarrow 0} \frac{\sin kd}{kd} = 1, \quad (2.66)$$

dla wartości  $kd \ll 1$  i  $\Psi = 0$  całkowita moc czynna układu dwóch źródeł jest czterokrotnie większa od mocy promieniowanej przez pojedynczy tłok, drgający z tą samą prędkością objętościową. Przy nierównych prędkościach objętościowych stosunek mocy wynikającej z wzajemnej rezystancji promieniowania do sumy mocy poszczególnych głośników wyraża się zależnością

$$q = \frac{2}{\frac{U_1}{U_2} + \frac{U_2}{U_1}} \quad (2.67)$$

Wartość  $q$ , a więc i wzajemne oddziaływanie, osiąga maksimum przy równych prędkościach objętościowych tłoków. Jeżeli przesunięcie fazowe wynosi  $\pi/2$ , to moc promieniowana przez zestaw jest sumą mocy promieniowanych przez poszczególne głośniki. Gdy  $\cos \Psi \neq 0$ , wartość mocy promieniowanej wskutek oddziaływań wzajemnych zależy od iloczynu  $kd$ .

Jeżeli jako kryterium występowania przyrostu mocy wskutek rezystancji wzajemnej przyjąć zmianę poziomu całkowitej mocy czynnej o 1 dB, to dla wartości

$$kd \geq 2,5 \quad (2.68)$$

wzajemne oddziaływanie źródeł ustaje.



### 2.2.3. Zależność mocy promieniowanej od transmitancji filtrów

Wstawiając do równania (2.65) wyrażenia na prędkości objętościowe dane wzorami (2.19) i korzystając z warunku (2.20) otrzymujemy

$$N = \frac{\rho c k^2}{2\pi} |\underline{x}(j\omega)|^2 |\underline{T}(j\omega)|^2 \left[ |\underline{E}_D(j\omega)|^2 + |\underline{E}_G(j\omega)|^2 + 2 \left| \underline{E}_D(j\omega) \right| \left| \underline{E}_G(j\omega) \right| \frac{\sin kd}{kd} \cos \psi \right] \quad (2.69)$$

W przypadku filtrów Butterwortha o transmitancjach danych wzorami (2.24) i (2.25)

$$|\underline{M}_p(j\omega)|^2 = 1 + \omega_n^{2p} \quad (2.70)$$

moc promieniowana wyraża się równaniem

$$N = \frac{\rho c k^2}{2\pi} |\underline{x}(j\omega)|^2 |\underline{T}(j\omega)|^2 \left[ 1 + \frac{2 \omega_n^p}{1 + \omega_n^{2p}} \frac{\sin kd}{kd} \cos \psi \right] \quad (2.71)$$

W zakresie powyżej rezonansu mechanicznego głośnika, gdzie można przyjąć warunek (2.20), transmitancja prędkościowo-napięciowa głośnika jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości [33]. Ponieważ we wzorze (2.71) występuje również przesuwność jednostkowa, proporcjonalna do częstotliwości, to charakterystykę mocową zestawu, rozumianą jako stosunek mocy wypromieniowanej do dostarczonej, w funkcji częstotliwości, można zapisać następująco

$$\eta(\omega) = \eta_0 \left[ 1 + \frac{2 \omega_n^p}{1 + \omega_n^{2p}} \frac{\sin kd}{kd} \cos \psi \right] \quad (2.72)$$

przy czym  $\eta_0$  jest współczynnikiem niezależnym od częstotliwości. Przesunięcie fazowe  $\psi$  zależy od rodzaju zastosowanej zwrotnicy. W przypadku ogólnym, gdy zwrotnica

poza filtrami zawiera również linię opóźniającą dla kompensacji przesunięcia środka promieniowania głośnika niskotonowego w głąb obudowy, przesunięcie to można zapisać następująco

$$\psi = \psi_0 + \omega \tau \quad (2.73)$$

przy czym  $\tau$  jest opóźnieniem wprowadzanym przez linię opóźniającą. Przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami na wyjściu dolnoprzepustowego i górnoprzepustowego filtra Butterwortha o transmitancjach danych równaniami (2.24) i (2.25) wynosi

$$\psi_0 = \pm p \frac{\pi}{2} \quad (2.74)$$

Znak tego przesunięcia zależy od sposobu sumowania /w tej samej lub przeciwnej fazie/. Wstawiając wzór (2.74) do równania (2.73), a to z kolei do (2.72), po przekształceniach trygonometrycznych i znormalizowaniu pulsacji i opóźnienia otrzymujemy charakterystyki mocowe dla zestawów z filtrami rzędu nieparzystego

$$\eta(\omega) = \eta_0 \left[ 1 \pm \frac{2 \omega_n^p}{1 + \omega_n^{2p}} \frac{\sin kd}{kd} \sin \omega_n t_n \right], p=1,3,\dots \quad (2.75)$$

i rzędu parzystego

$$\eta(\omega) = \eta_0 \left[ 1 \pm \frac{2 \omega_n^p}{1 + \omega_n^{2p}} \frac{\sin kd}{kd} \cos \omega_n t_n \right], p=2,4,\dots \quad (2.76)$$

Jak widać, w zakresie występowania wzajemnych oddziaływań pomiędzy głośnikami, wprowadzenie elektrycznego opóźnienia sygnału doprowadzanego do jednego z głośników powoduje nierównomierność charakterystyki mocowej. Gdy opóźnienie elektryczne jest równe zeru, charakterystyki mocowe mają postać następującą

$$\eta(\omega) = \eta_0 \quad p = 1, 3, \dots \quad (2.77)$$

$$\eta(\omega) = \eta_0 \left[ 1 \pm \frac{2\omega_n^2}{1 + \omega_n^{2p}} \right] \quad p = 2, 4, \dots \quad (2.78)$$

Nierównomierność charakterystyki mocowej zestawu, danej równaniem (2.72), wywołana wzajemnymi oddziaływaniami pomiędzy głośnikami może osiągnąć wartość maksymalną przy pulsacji równej pulsacji rozdziału zwrotnicy

$$\omega = \omega_0 \quad (2.79)$$

Aby mogła ona tę wartość osiągnąć, muszą być spełnione jednocześnie trzy warunki:

$$\psi = \frac{\pi}{2} \quad (2.80)$$

$$ka_1 \leq 1, \quad ka_2 \leq 1 \quad (2.81)$$

$$kd < 2,5$$

Warunek (2.80) zależy od rodzaju zwrotnicy. Warunek (2.81) praktycznie nigdy nie jest spełniony, gdyż w celu maksymalnego wykorzystania głośników częstotliwości rozdziału wybiera się zwykle dużo powyżej zakresu tłokowego głośnika niskotonowego [84]. Warunek (2.82) po wstawieniu pulsacji równej pulsacji rozdziału (2.79) i uwzględnieniu stałych można zapisać następująco

$$f_0 < \frac{137}{d} \quad (2.83)$$

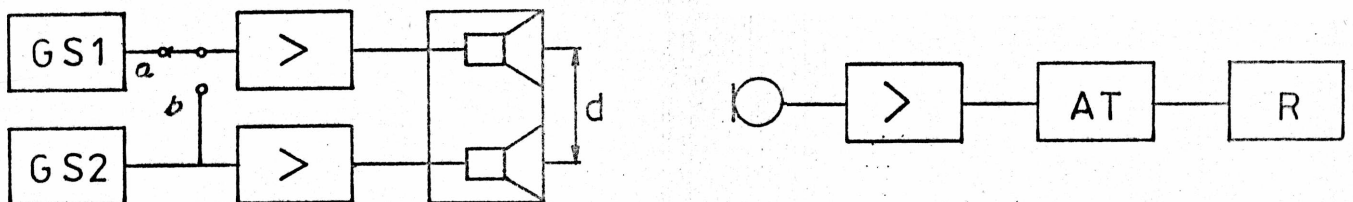
Tak więc, aby wystąpił istotny przyrost mocy w przypadku zestawu z głośnikami oddalonymi o np. 20 cm, częstotliwość rozdziału powinna być mniejsza od 700 Hz. Porównanie wyników obliczeń według wzoru (2.83) z danymi katalogowymi zestawów pozwala zauważyć, że występujące częstotliwości rozdziału kilkakrotnie przewyższają wynikające ze wzoru (2.83). Można zatem stwierdzić, że w przeważającej większości zestawów praktycznie

nie występują nierównomierności charakterystyki mocowej, związane z rozmieszczeniem głośników i to niezależnie od zwrotnicy. Wynika stąd, że podane w pracy [5] zalecenie, żeby dla uniknięcia nierównomierności charakterystyki mocowej stosować wyłącznie filtry nieparzystego rzędu, jest nie w pełni zasadne.

#### 2.2.4. Pomiary charakterystyk mocowych

Weryfikację eksperymentalną wyników przedstawionych powyżej rozważań przeprowadzono w studio odsłuchowym o parametrach zbliżonych do przeciętnego pomieszczenia mieszkalnego.

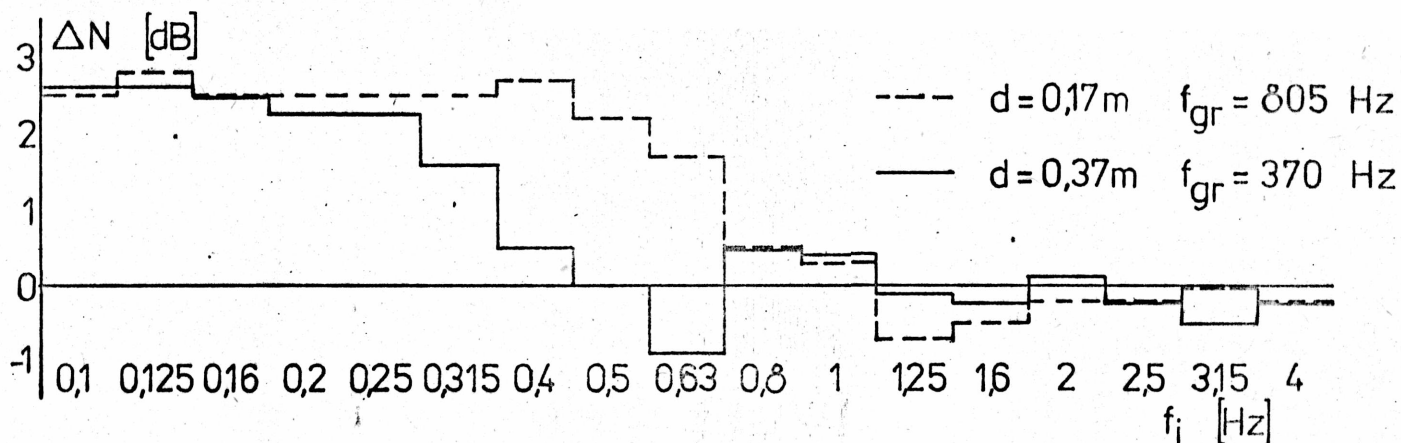
W pierwszej części pomiarów zmierzono przyrost mocy promieniowanej przez układ dwóch głośników zasilanych z tego samego generatora w stosunku do mocy promieniowanej przez głośniki zasilane z niezależnych źródeł. Charakterystyki skuteczności głośników przedstawione są na rys. 2.4.



Rys.2.5. Układ do pomiaru zwiększenia mocy promieniowanej skutek interakcji pomiędzy głośnikami:GS-generator szumu, AT-analizator tercjowy, R-rejestrator.

Układ pomiarowy podany jest na rys. 2.5. W pozycji (a) przełącznika obydwa głośniki zasilane są z niezależnych generatorów szumu i moc promieniowana przez układ jest równa sumie mocy promieniowanych przez poszczególne głośniki. W pozycji (b)

sygnały doprowadzane do głośników są jednakowe, stąd moc promieniowana przez zestaw w zakresie określonym warunkiem (2.82) powinna być większa, niż mierzona w pozycji (a). Miarą promieniowanej mocy był mierzony w pasmach tercjowych kwadrat wartości skutecznej ciśnienia akustycznego, uśredniony dla trzech punktów pomieszczenia, znajdujących się w odległości od głośnika przewyższającej promień krytyczny pomieszczenia.

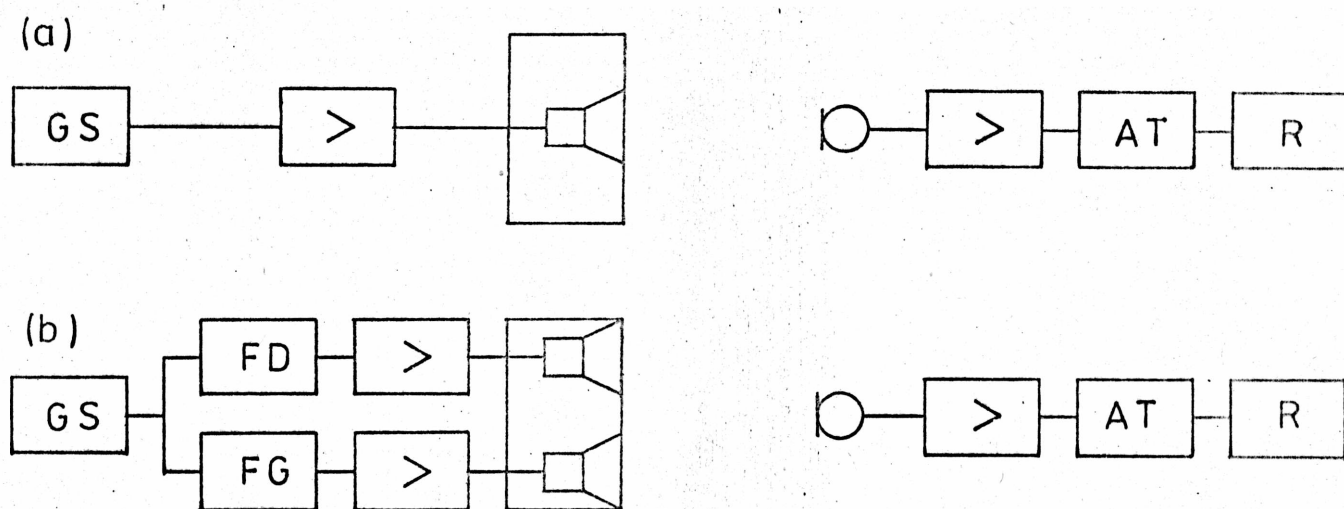


Rys.2.6. Przyrost mocy promieniowanej wskutek wzajemnych oddziaływań w układzie dwóch głośników dla dwóch odległości  $d$  pomiędzy głośnikami w pasmach tercjowych o częstotliwości środkowej  $f_i$ .

Na rys.2.6 przedstawiona jest różnica wyników pomiarów w pozycji (b) i (a), zmierzona dla dwóch odległości pomiędzy głośnikami  $d = 0,17\text{m}$  i  $d = 0,37\text{m}$ . Jak widać, po przekroczeniu częstotliwości obliczonych z wzoru (2.53) wzajemne oddziaływania pomiędzy głośnikami zanikają.

W drugiej części pomiarów zmierzono charakterystyki mocowe zestawów głośnikowych. Ponieważ wpływ wzajemnych oddziaływań pomiędzy głośnikami może wystąpić w przypadku filtrów Butterwortha jedynie rzędów parzystych, do pomiarów

wybrano zwrotnice drugiego rzędu. Gdyby wzajemne oddziaływania pomiędzy głośnikami nie występowały, to drugi składnik w nawiasie we wzorze (2.72) byłby równy zero. Takiej sytuacji odpowiadają wyniki pomiarów mocy w układzie z rys. 2.7a.



Rys.2.7. Układy do pomiaru wpływu wzajemnych oddziaływań pomiędzy głośnikami w zestawie głośnikowym na promieniowaną moc; a/ układ do pomiaru charakterystyki odniesienia, b/ układ do pomiaru charakterystyki mocowej zestawu; GS-generator szumu, FD i FG - filtry zwrotnicy, AT - analizator trójczłonowy, R - rejestrator.

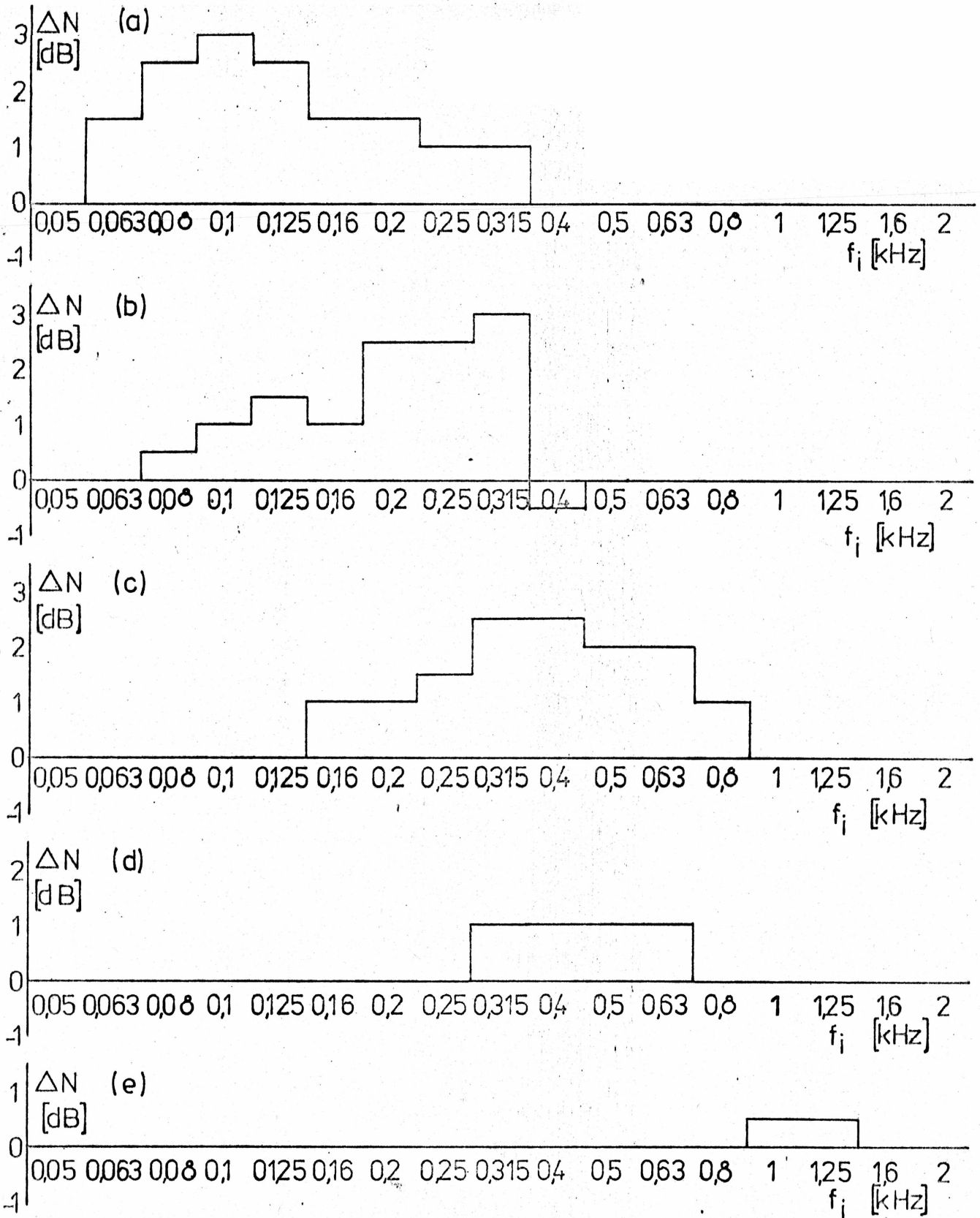
Doprowadzenie tego samego sygnału, poprzez zwrotnicę do dwóch jednakowych głośników /rys.2.7b/ daje charakterystykę mocową określoną równaniem (2.78).

Miarą zmiany mocy promieniowanej przez zestaw, wskutek występowania wzajemnej impedancji promieniowania jest różnica charakterystyk, zmierzonych w układzie z rys. 2.7b i 2.7a. Maksymalna wartość tej różnicy występująca przy częstotli-

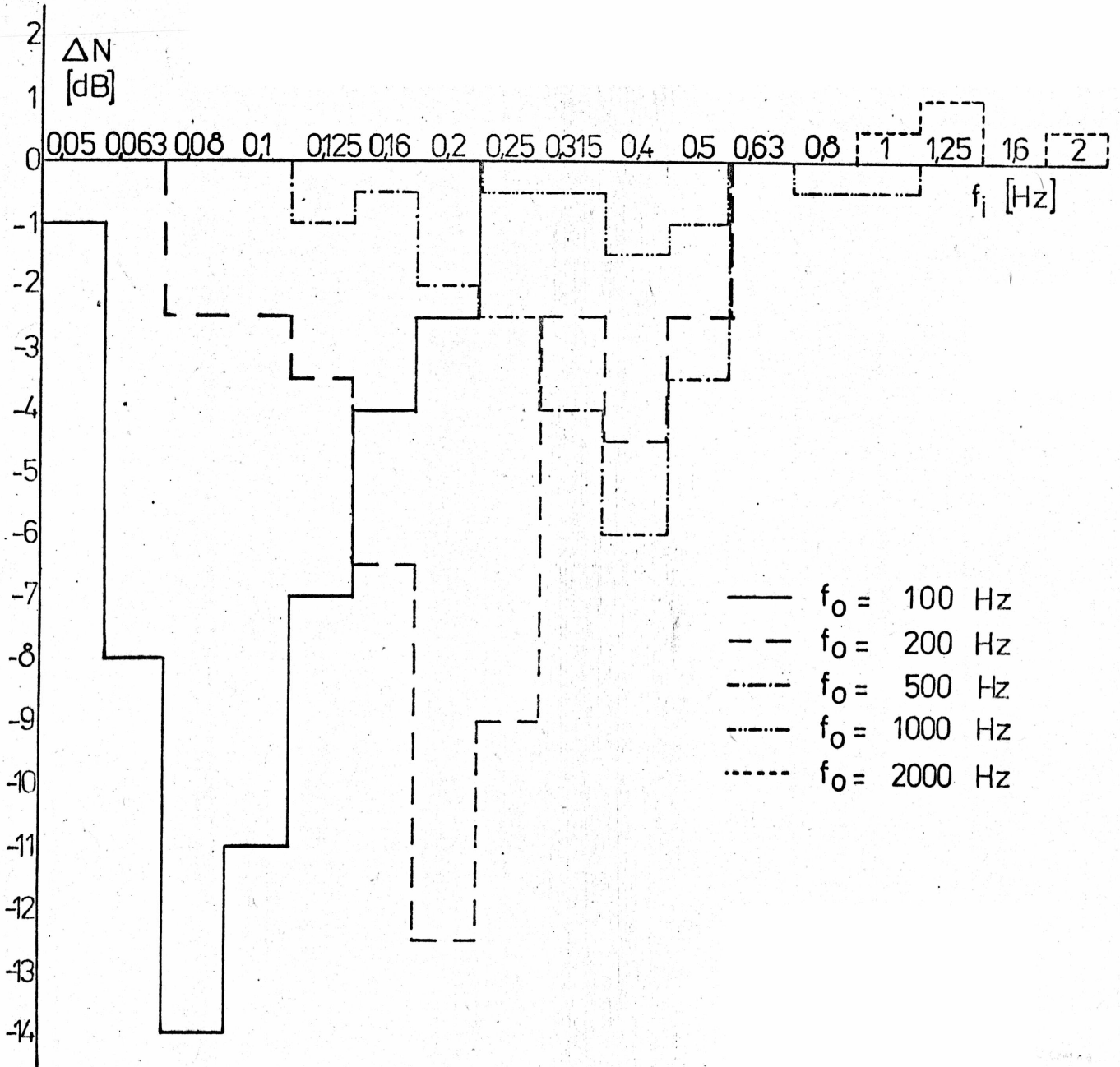
wości rozdziału może wynosić 3 dB /gdy głośniki są podłączone w przeciwnej fazie/ lub  $-\infty$  (gdy głośniki mają fazę zgodną). Charakterystyki mocowe zmierzono dla częstotliwości rozdziału wynoszących 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1000 Hz i 2000 Hz. Odległość pomiędzy głośnikami  $d$  była równa 0,17 m.

Na rysunku 2.8 przedstawione są określone wyżej różnice charakterystyk mocowych dla przypadku głośników zasilanych w przeciwnej fazie. Jak widać, ze wzrostem częstotliwości rozdziału wpływ wzajemnych oddziaływań pomiędzy głośnikami maleje, a po przekroczeniu obliczonej ze wzoru wartości  $f = 805$  Hz dla  $d = 0,17$  m, ustaje. Podobnie jest w przypadku charakterystyk zestawu z głośnikami przyłączonymi w zgodnej fazie /rys.2.9/.





Rys.2.8. Zwiększenie, wskutek interakcji mocy, promieniowanej przez zestaw z filtrami drugiego rzędu i głośnikami przyłączonymi w przeciwnej fazie, w pasmach tercjowych o częstotliwości środkowej  $f_i$  dla różnych częstotliwości rozdziału: a/  $f_0 = 100$  Hz, b/  $f_0 = 200$  Hz, c/  $f_0 = 500$  Hz d/  $f_0 = 1000$  Hz, e/  $f_0 = 2000$  Hz.



Rys.2.9. Przyrost, wskutek oddziaływań wzajemnych, mocy promieniowanej przez zestaw z filtrami drugiego rzędu i głośnikami przyłączonymi w zgodnej fazie, w pasmach tercjowych o częstotliwości środkowej  $f_1$  [kHz] dla częstotliwości rozdzielu wynoszących 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1000 Hz i 2000 Hz.

### 2.3. Rozmieszczenie głośników w zestawach a transmisja informacji kierunkowej w układzie stereofonicznym

W równaniach (2.29) i (2.30) widać zależność charakterystyki skuteczności zestawu głośnikowego od kąta  $\psi$ , zawartego pomiędzy osią zestawu a kierunkiem odsłuchu. W przypadku zwrotnic rzędu nieparzystego charakterystyka zmienia się inaczej dla dodatnich, inaczej dla ujemnych wartości kąta  $\psi$ . Z przebiegiem charakterystyk skuteczności zestawów związane jest natężenie dźwięku, docierającego do słuchacza, które z kolei jest czynnikiem współdecydującym o lokalizacji transmitowanych obrazów dźwiękowych.

Tak więc znalezienie związku pomiędzy zmianą kąta odsłuchu a wynikającą stąd zmianą natężenia dźwięku docierającego do słuchacza od prawego i lewego głośnika dostarczy miary pozwalającej oceniać obszar odsłuchu stereofonicznych układów dźwiękonadawczych.

#### 2.3.1. Wskaźniki lokalizacyjne w układzie stereofonicznym

Podstawowym zjawiskiem psychoakustycznym, na którym oparte są zasady wielokanałowej transmisji dźwięku, jest występowanie tzw. lokalizacji sumacyjnej [11]. Polega ono na tym, że dwa koherentne sygnały akustyczne dochodzące do słuchacza z różnych kierunków są spostrzegane jako jeden dźwięk. Umiejscowienie tego dźwięku w przestrzeni zależne jest od różnicy pomiędzy poziomami natężenia obu sygnałów oraz od ich wzajemnego opóźnienia. Obydwa wskaźniki lokalizacyjne, natężeniowy i czasowy są analizowane przez organ słuchu oddzielnie [77] i dopiero na wyższych piętrach układu nerwowego mózg podejmuje decyzję o kierunku, z którego przychodzi dźwięk. Reguły decyzyjne nie są znane pod względem ilościowym dla przypadku ogólnego, można jedynie stwierdzić, że efekty oddziaływania obu wskaźników mogą się kumu-

lować lub znosić wzajemnie.

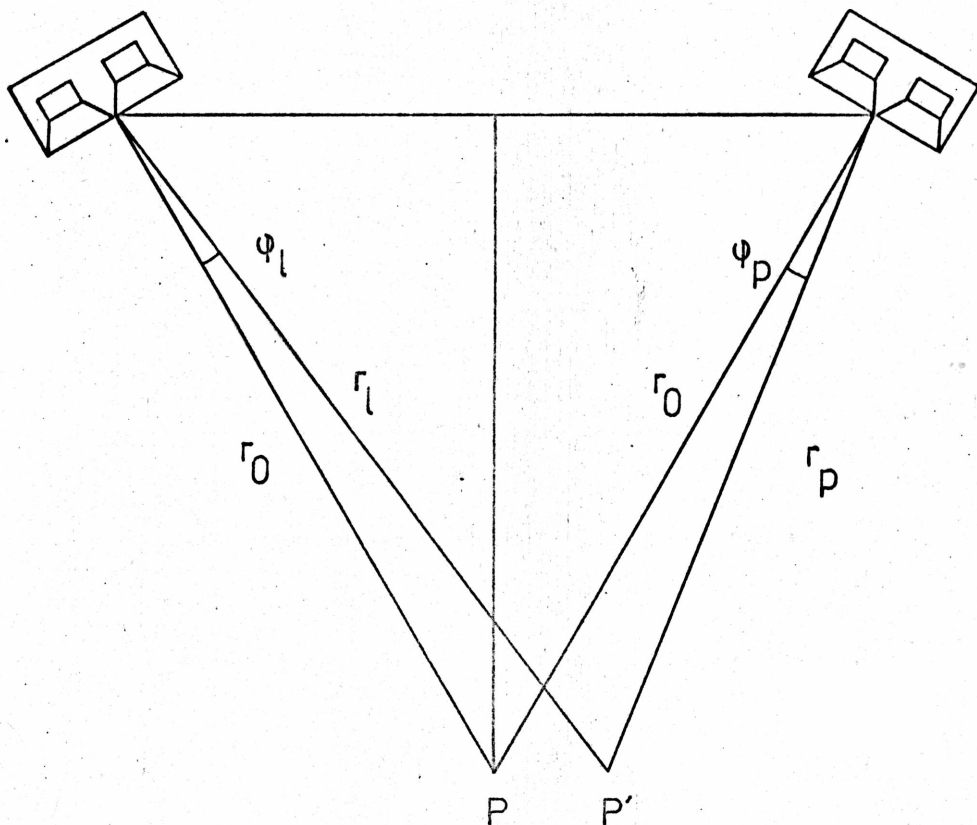
Czasowy wskaźnik lokalizacyjny zdefiniowany jest jako różnica czasów dojścia od prawego i lewego głośnika.

$$\tau = \tau_p - \tau_l \quad (2.84)$$

co dla pola dalekiego zestawów, gdzie fala jest lokalnie płaska można zapisać

$$\tau = \frac{r_p - r_l}{c} \quad (2.85)$$

przy czym  $r_p$  i  $r_l$  są odległościami od zestawów.



Rys.2.10. Geometria stereofonicznego układu odsłuchowego.

Niech dla układu z rys. 2.10 natężeniowy wskaźnik lokalizacyjny będzie określony jako różnica poziomów natężenia dźwięku docierającego do słuchacza z lewego i prawego zestawu

$$R = 10 \lg I_1(\varphi_1) - 10 \lg I_p(\varphi_p) = 10 \lg \frac{I_1(\varphi_1)}{I_p(\varphi_p)} \quad (2.86)$$

przy czym  $I(\varphi)$  jest natężeniem dźwięku docierającego do słuchacza znajdującego się pod kątem  $\varphi$  względem danego zestawu. Jeśli  $I_1 = I_p$ , to wskaźnik  $R$  jest równy zeru i słuchacz lokalizuje dźwięk na osi układu.

Średnie natężenie dźwięku jest równe [79]

$$I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p v dt \quad (2.87)$$

Dla fali płaskiej

$$pv = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.88)$$

stąd

$$I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{\rho c} dt \quad (2.89)$$

Z twierdzenia Rayleigha [15] wynika

$$\int_0^T p^2(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty |P_T(j\omega)|^2 d\omega \quad (2.90)$$

przy czym  $P_T(j\omega)$  jest widmem bieżącym procesu  $p(t)$

$$P_T(j\omega) = \int_0^T p(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.91)$$

Korzystając z (2.89) i (2.90) można zapisać

$$\begin{aligned} I &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2}{\rho c} dt = \frac{1}{\pi \rho c} \int_0^\infty \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|P_T(j\omega)|^2}{T} d\omega \\ &= \frac{1}{\pi \rho c} \int_0^\infty G(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (2.92)$$

przy czym

$$G(\omega) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|P_T(j\omega)|^2}{T} \quad (2.93)$$

jest widmową gęstością mocy sygnału akustycznego.

Jeżeli widmowa gęstość mocy sygnału promieniowanego przez zestaw jest równa  $G(\omega, 0)$  w punkcie położonym na osi zestawu, to w punkcie położonym pod kątem  $\psi$  wynosi ona

$$G(\omega, \psi) = G(\omega, 0) |D(\omega, \psi)|^2 = G(\omega, 0) D(\omega, \psi)^2 \quad (2.94)$$

przy czym  $D(\omega, \psi)$  jest charakterystyką kierunkowości zestawu.

Wstawiając zależności (2.92) i (2.94) do wzoru (2.86) otrzymuje się wyrażenie na natężeniowy wskaźnik lokalizacyjny w postaci

$$R = 10 \lg \frac{\int_0^{\omega_g} G(\omega, 0) |D_1(\omega, \psi_1)|^2 d\omega}{\int_0^{\omega_g} G(\omega, 0) |D_p(\omega, \psi_p)|^2 d\omega} \quad (2.95)$$

We wzorze tym wprowadzono skończoną wartość górnej granicy całkowania  $\omega_g$ , co wynika z ograniczoności pasma częstotliwości akustycznych.

Dla niewielkich przemieszczeń słuchacza względem osi symetrii typowego układu odsłuchowego [82] można przyjąć

$$\psi_1 = \psi_p = \psi \quad (2.96)$$

Natężeniowy wskaźnik lokalizacyjny jest zatem równy

$$R = 10 \lg \frac{\int_0^{\omega_g} G(\omega, 0) D_1(\omega, \psi)^2 d\omega}{\int_0^{\omega_g} G(\omega, 0) D_p(\omega, \psi)^2 d\omega} \quad (2.97)$$



### 2.3.2. Zależność natężeniowego wskaźnika lokalizacyjnego od charakterystyki kierunkowości zestawów

Przemieszczenie słuchacza w bok od osi symetrii układu spowoduje, że znajdzie się on bliżej jednego z głośników. Jeżeli przemieszczenie nastąpi na prawo, jak na rys. 2.10, to znak czasowego wskaźnika lokalizacyjnego będzie ujemny. Od znaku wskaźnika natężeniowego będzie zależeć, czy i o ile pozorne źródło dźwięku przesunie się bliżej prawego głośnika. Jeżeli wskaźnik  $R$  będzie również ujemny, to przesunięcie pozornego źródła w prawo będzie największe. Jeśli jednak wskaźnik  $R$  będzie dodatni, skompensuje oddziaływanie wskaźnika czasowego i przy odpowiedniej jego wartości źródło nie przemieści się.

Określenie znaku wskaźnika  $R$  w zależności od rodzaju zwrotnicy i rozmieszczenia głośników pozwoli zatem na ocenę wrażliwości układu odsłuchowego na przesunięcie punktu odsłuchu poza oś symetrii zestawu.

Rozpatrzmy przypadek, gdy rozmieszczenie głośników w obydwu zestawach jest identyczne. Charakterystyki kierunkowości zestawów będą również jednakowe. Przemieszczenie słuchacza nieco w bok od osi symetrii układu odsłuchowego spowoduje jednakową zmianę natężenia sygnału docierającego od obydwu zestawów i w rezultacie wartość natężeniowego wskaźnika lokalizacyjnego pozostanie równa zero.

Inaczej wygląda sprawa w przypadku układu symetrycznego, w którym rozmieszczenie głośników w jednym zestawie stanowi lustrzane odbicie rozmieszczenia głośników w zestawie drugim. Jeżeli przyjąć dla przykładu, że rozmieszczenie głośników w lewym zestawie odpowiada przedstawionemu na rys. 2.1, tzn. głośnik wysokotonowy położony jest w prawo od niskotonowego, to charakterystyka kierunkowości tego zestawu dana jest wzorami (2.29) lub (2.30). Rozmieszczenie głośników w prawym zestawie jest lustrzanym odbiciem



rozmieszczenia w lewym, co jest równoważne zmianie kierunku współrzędnej  $\psi$ . Wskutek parzystości funkcji kosinus we wzorze (2.30) w przypadku zestawów z filtrami rzędu parzystego charakterystyki kierunkowości obydwu zestawów będą jednakowe i wskaźnik natężeniowy będzie równy zeru. Jednakże we wzorze (2.29) nastąpi zmiana znaku w nawiasie kwadratowym. Zatem w przypadku zestawów z filtrami rzędów nieparzystych postać natężeniowego wskaźnika lokalizacyjnego będzie następująca

$$R = 10 \lg \frac{\int_0^{\omega_{ng}} G(\omega_n, 0) \left[ 1 - \frac{(-1)^{\frac{p-1}{2}} 2\omega_n^p}{1 + \omega_n^{2p}} \sin\left(\frac{\omega_0^d}{c} \omega_n \cos \delta \sin \psi\right) \right] d\omega_n}{\int_0^{\omega_{ng}} G(\omega_n, 0) \left[ 1 + \frac{(-1)^{\frac{p-1}{2}} 2\omega_n^p}{1 + \omega_n^{2p}} \sin\left(\frac{\omega_0^d}{c} \omega_n \cos \delta \sin \psi\right) \right] d\omega_n} \quad (2.98)$$

Wzór ten obowiązuje dla omawianego rozmieszczenia, gdy głośniki niskotonowe znajdują się dalej od osi symetrii układu niż wysokotonowe. Dla zwięzłości takie rozmieszczenie będzie oznaczone DG-GD.

W przypadku rozmieszczenia odwrotnego, tzn. GD-DG znak minus w całości znajdującej się w liczniku zmienia się na plus, a w mianowniku odwrotnie.

Wzór (2.98) można przepisać w innej postaci

$$R = 10 \lg \frac{\int_0^{\omega_{ng}} G(\omega_n, 0) d\omega_n - (-1)^{\frac{p-1}{2}} \int_0^{\omega_{ng}} G(\omega_n, 0) \frac{2\omega_n^p}{1 + \omega_n^{2p}} \sin\left(\frac{\omega_0^d}{c} \omega_n \cos \delta \sin \psi\right) d\omega_n}{\int_0^{\omega_{ng}} G(\omega_n, 0) d\omega_n + (-1)^{\frac{p-1}{2}} \int_0^{\omega_{ng}} G(\omega_n, 0) \frac{2\omega_n^p}{1 + \omega_n^{2p}} \sin\left(\frac{\omega_0^d}{c} \omega_n \cos \delta \sin \psi\right) d\omega_n} =$$

$$= 10 \lg \frac{I_0 - (-1)^{\frac{p-1}{2}} I_1}{I_0 + (-1)^{\frac{p-1}{2}} I_1} \quad (2.99)$$

Jak widać, znak wskaźnika R zależy od znaku całki  $I_1$  oraz rzędu filtra zwrotnicy p. Dla bardzo małych wartości kąta zachodzi

$$\sin \frac{\omega_0^d}{c} \omega_n \cos \delta \sin \psi \approx \frac{\omega_0^d}{c} \cos \delta \sin \psi \quad (2.100)$$

W rozpatrywanym przypadku przemieszczenia słuchacza w stronę prawego zestawu kąt  $\psi$  jest dodatni, funkcja podcałkowa w całce  $I_1$  jest również dodatnia, wartość dodatnią, ma więc także całka  $I_1$ . Gdy zestaw zawiera filtry pierwszego rzędu wartość wskaźnika R jest ujemna

$$R = 10 \lg \frac{I_0 - I_1}{I_0 + I_1} < 0 \quad (2.101)$$

Ujemny jest również wskaźnik czasowy, zgodnie ze wzorem (2.84). Gdy słuchacz przesunie się bliżej lewego zestawu, wskaźnik czasowy będzie dodatni, ale równocześnie kąt  $\psi$  będzie ujemny, zmienią się więc znaki całek  $I_1$  i tym samym wskaźnik natężeniowy będzie również dodatni.

Można zatem stwierdzić, że w przypadku symetrycznego stereofonicznego układu odsłuchowego złożonego z zestawów z filtrami pierwszego rzędu, z głośnikami połączonymi w fazie i rozmieszczonymi w taki sposób, że głośniki niskotonowe są zewnętrznymi (DG-GD), znaki czasowego i natężeniowego wskaźnika lokalizacyjnego są jednakowe przy przemieszczeniu słuchacza poza oś układu. Oznacza to dużą wrażliwość układu na zmianę pozycji słuchacza. Jeśli jednak zamienić miejscami zestawy, otrzyma się układ GD-DG w którym znaki wskaźników będą przeciwne, w rezultacie czego wystąpi ich kompensacja.

W przypadku zestawów z filtrami trzeciego rzędu wskaźnik R jest równy

$$R = 10 \lg \frac{I_0 + I_1}{I_0 - I_1} \quad (2.102)$$

a więc sytuacja jest odwrotna - kompensacja nastąpi w układzie DG-GD, natomiast przy ustawieniu GD-DG wystąpi zwiększenie wrażliwości układu na zmianę miejsca odsłuchu.

Gdy zmiany kąta są większe, wzór (2.100) nie jest słuszny i ocenę znaku całki  $I_1$  trzeba przeprowadzić inaczej. Całkę tę można zapisać w postaci sumy całek

$$I_1 = \int_0^{\omega_{ng}} G(\omega_n, 0) \frac{2\omega_n^p}{1+\omega_n^{2p}} \sin\left(\frac{\omega_0^d}{c} \omega_n \cos\delta \sin\psi\right) d\omega_n =$$

$$= \sum_{i=1}^{i=g} \frac{\int_0^{\omega_0^d \cos\delta \sin\psi} \frac{c\pi i}{\omega_0^d \cos\delta \sin\psi} G(\omega_n, 0) \frac{2\omega_n^p}{1+\omega_n^{2p}} \sin\left(\frac{\omega_0^d}{c} \omega_n \cos\delta \sin\psi\right) d\omega_n}{\frac{c\pi(i-1)}{\omega_0^d \cos\delta \sin\psi}} \quad (2.103)$$

Funkcja  $G(\omega_n, 0)$  jest dodatnia, podobnie funkcja

$$W(\omega_n) = \frac{2\omega_n^p}{1+\omega_n^{2p}} \quad (2.104)$$

Granice całek wchodzących w szereg dobrano w taki sposób, że przypadają one na kolejne wartości zerowe funkcji

$$\sin \frac{\omega_0^d}{c} \omega_n \cos\delta \sin\psi .$$

W rezultacie otrzymano szereg przemienny. Suma tego szeregu będzie dodatnia, jeżeli wartość bezwzględna każdego wyrazu o numerze parzystym będzie mniejsza od wartości poprzedzającego go wyrazu o numerze nieparzystym.

Funkcja  $W(\omega_n)$  ma maksimum przy  $\omega_n=1$  i następnie monotonicznie maleje. Widmowa gęstość mocy sygnałów fonicznych  $G(\omega_n, 0)$  również maleje monotonicznie po przekroczeniu częstotliwości około 500 do 700 Hz [22,42,57]. Dla danej pulsacji rozdziału  $\omega_0$  i rozmieszczenia głośników określają-

cego wartość wyrażenia  $\frac{d}{c} \cos \delta$  istnieje zatem pewien zakres zmian kąta  $\psi$  w którym znak całki  $I_1$  jest zgodny ze znakiem kąta  $\psi$ . Wielkość tego zakresu zależy od rozmieszczenia głośników i częstotliwości rozdziału - im mniejsza częstotliwość rozdziału, tym jest on szerszy.

Można więc stwierdzić, że sposób rozmieszczenia głośników w zestawach wchodzących w skład stereofonicznego układu odsłuchowego ma wpływ na zmiany lokalizacji pozornego źródła dźwięku występujące przy przemieszczeniach słuchacza poza oś główną układu. Wpływ ten występuje w niewielkim obszarze w pobliżu osi głównej układu. Odpowiedni dobór zestawów daje możliwość kompensacji wskaźników czasowych przez natężeniowe, co pozwala na przykład na swobodne ruchy głową, bez obawy, że przy małym nawet jej przechyleniu źródło pozorne przesunie się nagle w stronę bliższego zestawu, jak to dzieje się w przypadku standardowych układów złożonych z jednakowych zestawów. Pomiarów opisanych właściwości stereofonicznych układów odsłuchowych złożonych z zestawów dwudrożnych oraz porównanie skuteczności kompensacji z innymi metodami, znanymi z literatury, zostaną przedstawione w rozdziale 3.4.

### 3. POMIARY PSYCHOAKUSTYCZNE WŁAŚCIWOŚCI ZESTAWÓW GŁOŚNIKOWYCH

Ostatecznej oceny jakości toru transmisji dźwięku dokonuje słuchacz. Kieruje się przy tym względami zarówno czysto subiektywnymi, takimi jak na przykład jego potrzeby estetyczne czy aktualny stan psychiczny, jak też pewnymi względami związanymi z właściwościami fizycznymi toru transmisyjnego. Na pierwsze z wymienionych konstruktor urządzeń elektroakustycznych nie ma praktycznie żadnego wpływu, dlatego też tym większą wagę przykładają się do badania i wykorzystywania związków istniejących pomiędzy percepcją dźwięku a właściwościami fizycznymi transmitujących go urządzeń.

Przeprowadzono wiele prac badawczych, mających na celu ustalenie związków pomiędzy poszczególnymi parametrami urządzeń i sygnałów a oceną jakości transmisji dźwięku np. [4,14, 29,35,37]. Poszukuje się również metod oceny globalnej, uwzględniającej wszystkie parametry [71,73]. Ponieważ efekty tych badań są jak dotąd niewielkie, szuka się metod porównawczych, pozwalających oceniać jakość, na przykład głośnika, bez wnikania w jego właściwości elektroakustyczne [70].

Metody porównawcze oceny słuchowej jakości głośników nie dają konstruktorowi żadnych bezpośrednich danych do projektowania. Metody oceny globalnej są, jak dotąd, tak słabo zaawansowane, że również nie mogą stanowić pomocy w projektowaniu. Ponieważ nie jest znana waga, z jaką poszczególne właściwości elektroakustyczne urządzenia składają się na efekt końcowy, należy dążyć do tego, aby wszystkie zmiany w sygnale dźwiękowym, wprowadzane przez układ, były niezauważalne. Punktem wyjścia do tego są pomiary zauważalności zniekształceń.

W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione rezultaty pomiarów psychoakustycznych zauważalności zniekształceń liniarnych sygnałów fonicznych, wynikających z faktu promieniowania poszczególnych części widma sygnału przez znajdujące się w różnych punktach głośniki. Dalej będą przedstawione

wyniki badań zauważalności zmian lokalizacji w układach stereofonicznych.

### 3.1. Metodyka pomiarów psychoakustycznych

Poniżej przedstawiono podstawowe dane, dotyczące metodyki wykonanych pomiarów. Bardziej szczegółowe omówienia techniki pomiaru są podane przy opisie poszczególnych eksperymentów.

#### 3.1.1. Procedury pomiarowe

W badaniach stosowano dwie psychoakustyczne metody pomiarowe: metodę stałych bodźców (SB) oraz metodę przymusowego wyboru (PW). Metody te są dobrze znane [16,26,78], toteż poniżej przedstawiono jedynie ich zarys, uwzględniający najistotniejsze szczegóły.

Procedura SB jest klasyczną metodą badania zjawisk progowych. W występującym w pracy zagadnieniu pomiaru progu różnicowego sprowadza się ona do podawania słuchaczowi par sygnałów, z których jeden jest nieznkształcony (sygnał wzorcowy - W) natomiast drugi może być znieształcony w różnym stopniu (sygnał badany -  $B_j$ ), indeks  $j$  oznacza stopień znieształcenia ( $B_0=W$ ). Zadanie, które stawia się słuchaczowi, można sformułować dwojako, w zależności od rodzaju sygnałów. Jeśli jest możliwe rozróżnienie pomiędzy sygnałami W i  $B_j$  w oparciu o pewną cechę sygnału (np. głośniejszy - cichszy, wyższy - niższy, bardziej na lewo - bardziej na prawo), wówczas można żądać określenia, czy sygnał  $B_j$  reprezentuje daną cechę w stopniu wyższym, niż sygnał W. Jeżeli różnicy pomiędzy sygnałami  $B_j$  i W nie można jednoznacznie opisać, można stawiać jedynie pytanie, czy występuje różnica pomiędzy tymi sygnałami. Wartości znieształceń dobiera się od równej zero



do wyraźniej zauważalnej, z tak ustalonego przedziału zmienności wybierano pięć wartości. Stopień zniekształceń  $j$  w kolejno nadawanych parach zmienia się losowo. Wykres stosunku odpowiedzi pozytywnych (np. "jest różnica" lub "B głośniejszy") do wszystkich odpowiedzi w funkcji stopnia zniekształceń stanowi krzywą psychometryczną zauważalności zniekształceń. Za wartość progową zniekształceń w psychoakustyce uważa się taką, przy której zauważalność jest równa 50% [78], w badaniach stosowanych wybiera się często inne wartości zauważalności [23].

Procedura PW jest nowoczesną wersją metody SB. W czasowej odmianie tej procedury, występującej w tej pracy, sygnał  $B_j$  występuje w jednym z dwóch lub więcej kolejnych przedziałów obserwacji /w pozostałych przedziałach występuje sygnał W/. Słuchacz musi wybrać ten przedział, dla którego - jego zdaniem - istnieje największe prawdopodobieństwo, że w nim właśnie wystąpił sygnał  $B_j$ . W zależności od liczby przedziałów obserwacji mówi się o przymusowym wyborze dwualternatywnym (2APW), trójalternatywnym (3APW) itd. W wyniku pomiaru otrzymuje się krzywą psychometryczną wiążącą stopień zniekształceń z tzw. procentem poprawnych odpowiedzi  $P(C)$ , który jest frakcją poprawnych wyborów spośród wszystkich odpowiedzi. Wartość progowa w tej metodzie wynosi

$$P_p(C) = \frac{n + 1}{2n} \quad (3.1)$$

przy czym  $n$  oznacza liczbę przedziałów obserwacji.

### 3.1.2. Słuchacze

W badaniach uczestniczyło w sumie 19 osób, studentów i pracowników Politechniki i Uniwersytetu. Słuchacze przeszli selekcyjne badania audiometryczne oraz specjalnie opracowane testy do sprawdzania przydatności do badań lokalizacji dźwięku [48].

W poszczególnych eksperymentach uczestniczyły mniejsze grupy słuchaczy, liczące od czterech do dziewięciu osób.



Wybór liczebności grup wynikał z zadania, jakie miały spełnić pomiary. Nie chodziło o ilościowe określenie pewnych zależności, które byłyby słuszne na przykład dla populacji Wrocławia, lecz o uchwycenie ogólnych prawidłowości. Zadanie to może wykonać mała grupa wyselekcjonowanych i wytrenowanych słuchaczy. Wytrenowanie zapewnia powtarzalność rezultatów, a jednocześnie otrzymywane wyniki są ostrzejsze niż w przypadku średniej z populacji [13] .

### 3.1.3. Sygnały

W pomiarach wykorzystano sygnały muzyczne wchodzące w skład zestawu probierczego materiału dźwiękowego, opracowanego w ITA Politechniki Wrocławskiej do oceny słuchowej głośników [69] . Zestaw ten jest zbliżony do zalecanego przez IEC zestawu do subiektywnych badań odbiorników radiowych [83] . Materiał dźwiękowy składał się z krótkich, trwających 5 do 10 s fragmentów muzycznych, nagranych w odpowiedni sposób na taśmę magnetyczną. Do metody SB wykorzystano taśmę na której każdy fragment powtarzał się dwukrotnie, do metody 3 APW służyła taśma na której każdy fragment powtarzał się czterokrotnie /w metodzie 3APW zniekształcenia mogły być wprowadzane tylko do 2,3 i 4 fragmentu, pierwszy był zawsze niezniekształcony i służył do przygotowania słuchacza/. Wszystkie fragmenty nagrane na taśmach były niezniekształcone - zniekształcenia wprowadzała aparatura odtwarzająca, właściwa dla danego eksperymentu.

### 3.1.4. Pomieszczenia odsłuchowe

Pomiary przeprowadzono w laboratoriach ITA. Właściwości komory bezpogłosowej są opisane w pracy [74] , a studia "nowego" i "starego" w pracach [70] i [81] .

### 3.1.5. Aparatura pomiarowa

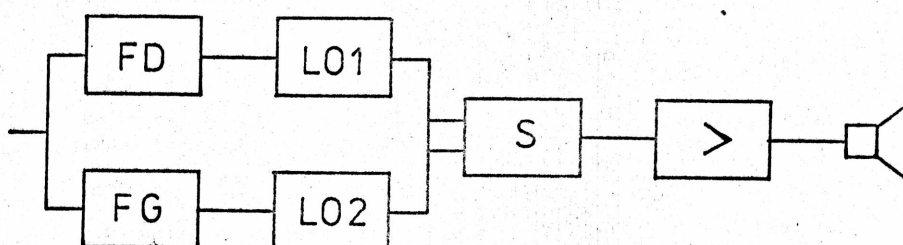
W pomiarach wykorzystywano wysokiej klasy aparaturę studyjną i pomiarową. Urządzenia specjalne jak filtry o regulowanej częstotliwości granicznej, linie opóźniające z opóźnieniem sterowanym częstotliwością [47], bramki elektroniczne, wykonano w Pracowni Percepcji Dźwięku ITA. W pomiarach stosowano głośniki GDN 16/10 w obudowach o pojemności 20 dm<sup>3</sup>. Głośniki zostały starannie dobrane pod względem przebiegu charakterystyk skuteczności (rys. 2.4)

### 3.2. Zauważalność zniekształceń wynikających z rozmieszczenia głośników przy transmisji monofonicznej

Jak stwierdzono w rozdziale 2.1 skutkiem tego, iż głośniki w płycie czołowej zestawu znajdują się w określonej odległości od siebie, jest przebieg charakterystyki kierunkowości zestawu, dany wzorami (2.29) lub (2.30). Równania te wskazują, że charakterystyki skuteczności zestawu, mierzone pod różnymi kątami, będą się różnić od charakterystyki zmierzonej na osi głównej. Tak więc sygnały, docierające do słuchacza znajdującego się poza osią główną zestawu, ulegną zniekształceniom linearnym w odniesieniu do sygnałów mierzonych na osi. Ponieważ zestaw głośnikowy powinien nagłaśniać jak największy obszar bez słyszalnych zniekształceń, konieczne jest zbadanie zauważalności tych zniekształceń. Określenie dopuszczalnych wartości zniekształceń w zależności od parametrów zestawu pozwoli optymalizować rozmieszczenie głośników. Równania (2.29) i (2.30) określają charakterystykę skuteczności zestawu w funkcji pulsacji znormalizowanej  $\omega_n$ , dla danego kąta  $\psi$ , w zależności od częstotliwości rozdziału  $\omega_0$  i parametrów  $d$  i  $\delta$  określających rozmieszczenie głośników. Każde z równań może przybierać inną postać ostateczną, w zależności od rzędu zwrotnicy  $p$  oraz sposobu

podłączenia głośników w fazie zgodnej lub przeciwnej. Ponadto na zauważalność może również wpływać pomieszczenie. Mimo tak dużej liczby zmiennych, możliwe jest przeprowadzenie pomiarów zauważalności dla wszystkich kombinacji parametrów. Podejście takie jest jednak nieracjonalne, gdyż liczba pomiarów narzuca bardzo wysoki koszt badań, wykonywanych przy pomocy płatnych słuchaczy, poza tym z punktu widzenia techniki pomiarów, bardzo trudna jest równoczesna kontrola tak wielu parametrów - na przykład praktycznie niewykonalna byłaby zmiana kąta  $\psi$  w półsekundowej przerwie pomiędzy fragmentami wchodzącymi w skład jednej pary.

Jak widać z wzorów (2.39) i (2.40) charakterystyki skuteczności zestawów można zapisać w funkcji zmiennej  $t_n$  zawierającej pulsację rozdziału  $\omega_0$ , parametry geometryczne zestawu  $d$  i  $\delta$  oraz kąt obserwacji  $\psi$ . Układem fizycznym, którego opis jest zgodny z przedstawionym tymi równaniami, jest model przedstawiony na rys. 3.1. W modelu tym filtry dolnoprzepustowy FD i górnoprzepustowy FG są filtrami stoso-



Rys.3.1. Model zestawu głośnikowego:  
FD, FG - filtry zwrotnicy, LO - linia opóźniająca, S - sumator /sumator odwracający/.

wanymi w zwrotnicach, linie opóźniające LO1 i LO2 realizują wzajemne opóźnienie małej i dużej częstotliwościowej części widma sygnału. Zamiast sumowania obu części widma sygnału na błonie bębnekowej słuchacza, sumowane są w sumatorze napięcia. W rezultacie sygnał promieniowany przez pojedynczy

głośnik szerokopasmowy ma charakterystyki opisane równaniami (2.39) i (2.40). Głośnik użyty w eksperymencie wprowadza oczywiście własne zniekształcenia linearne, lecz są one jednakowe dla każdego  $t_n$ , a więc nie mają wpływu na wynik eksperymentu opartego o potównywanie sygnałów W i B<sub>j</sub>.

Zastosowanie w badaniach modelu zestawu pozwoliło otrzymać w dowolnym punkcie jego pola akustycznego zniekształcenia linearne /w odniesieniu do  $t_n = 0$ /, które w przypadku rzeczywistego zestawu mogą wystąpić tylko pod określonym kątem  $\varphi$ . Jednocześnie zmiany parametrów geometrycznych zestawu można było sterować elektronicznie przez zmianę opóźnień linii opóźniających.

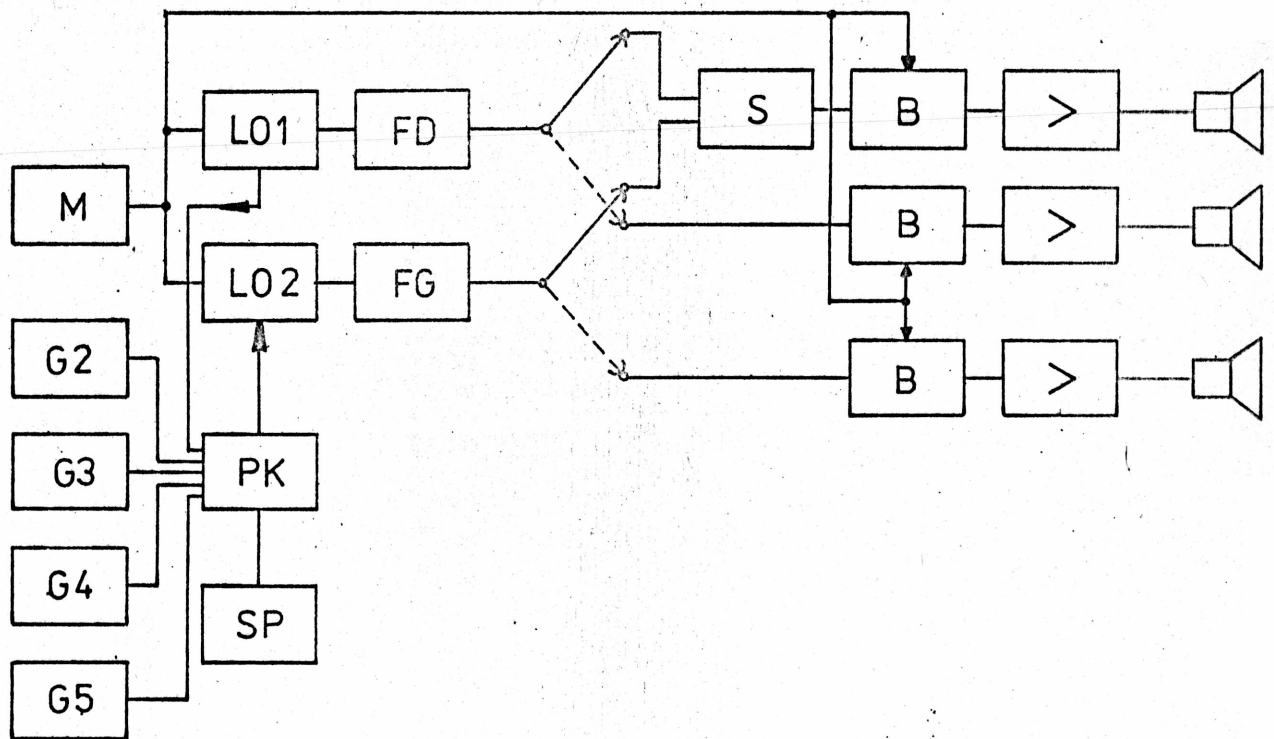
Z punktu widzenia zniekształceń charakterystyki skuteczności dla danego  $t_n$  zestaw rzeczywisty i jego model są w pełni równoważne. Występuje natomiast różnica w ich charakterystykach mocowych, a zatem różne będą pola rozproszone. Charakterystyka mocowa zestawu rzeczywistego bez linii opóźniającej opisana jest równaniami (2.77) lub (2.78). W przypadku modelu zestawu  $d=0$  i zgodnie z zależnością (2.66) charakterystyki mocowe przyjmują postać

$$\eta(\omega) = \eta_0 \left[ 1 \pm \frac{2 \omega_n^p}{1 + \omega_n^{2p}} \sin \omega_n t_n \right] \quad p=1,3,\dots \quad (3.2)$$

$$\eta(\omega) = \eta_0 \left[ 1 \pm \frac{2 \omega_n^p}{1 + \omega_n^{2p}} \cos \omega_n t_n \right] \quad p=2,4,\dots \quad (3.3)$$

### 3.2.1. Układ pomiarowy

Badania zauważalności prowadzono posługując się układem podanym na rys. 3.2.



Rys.3.2. Układ do pomiaru zauważalności zniekształceń nieliniarnych: M-magnetofon, G-generatory, PK-przełącznik kanałów, SP-źródło sygnałów przełączających, LO-linia opóźniająca, FD,FG-filtry, S-sumator, B-bramka.

W pozycji przełącznika oznaczonej linią ciągłą prowadzono pomiary z wykorzystaniem modelu zestawu. W pozycji oznaczonej linią przerywaną badano zauważalność dla rzeczywistych zestawów. W tych ostatnich badaniach wykorzystano linie opóźniające, podobnie jak w badaniach modelowych aby uzyskiwać natychmiastowe zmiany charakterystyki układu /w przeciwnym przypadku należałoby przesadzać słuchacza lub obracać zestaw głośnikowy/. Bramki, sterowane sygnałem właściwym, służyły do zamykania toru na czas przełączania, aby słuchacz nie słyszał trzasków. Zastosowane czynne filtry Butterwortha pozwalały uzyskiwać częstotliwości rozdziału z zakresu od 100 Hz do 10 kHz i nachylenia charakterystyk 6,12 i 18 dB/okt. Sumator pozwalał dodawać sygnały w fazie zgodnej oraz z odwróceniem fazy. Ustawianie zadanej wartości opóźnienia  $t_n$  realizowano przez sterowanie elektronicznej linii



opóźniającej LO2 sygnałem o odpowiedniej częstotliwości z generatorów G2...G5 i generatora wewnętrznego linii opóźniającej LO1. Jeśli obydwie linie opóźniające były sterowane z generatora wewnętrznego LO1, to opóźnienie  $t_n$  było równe zero, nie było więc zniekształceń. Przełączenie generatora powodowało wprowadzenie określonego opóźnienia  $t_n$ , a więc także określone zniekształcenia linearne. Źródło sygnałów sterujących działało według zadanego kodu losowego, w zależności od typu przeprowadzanego eksperymentu /SB lub 3APW/.

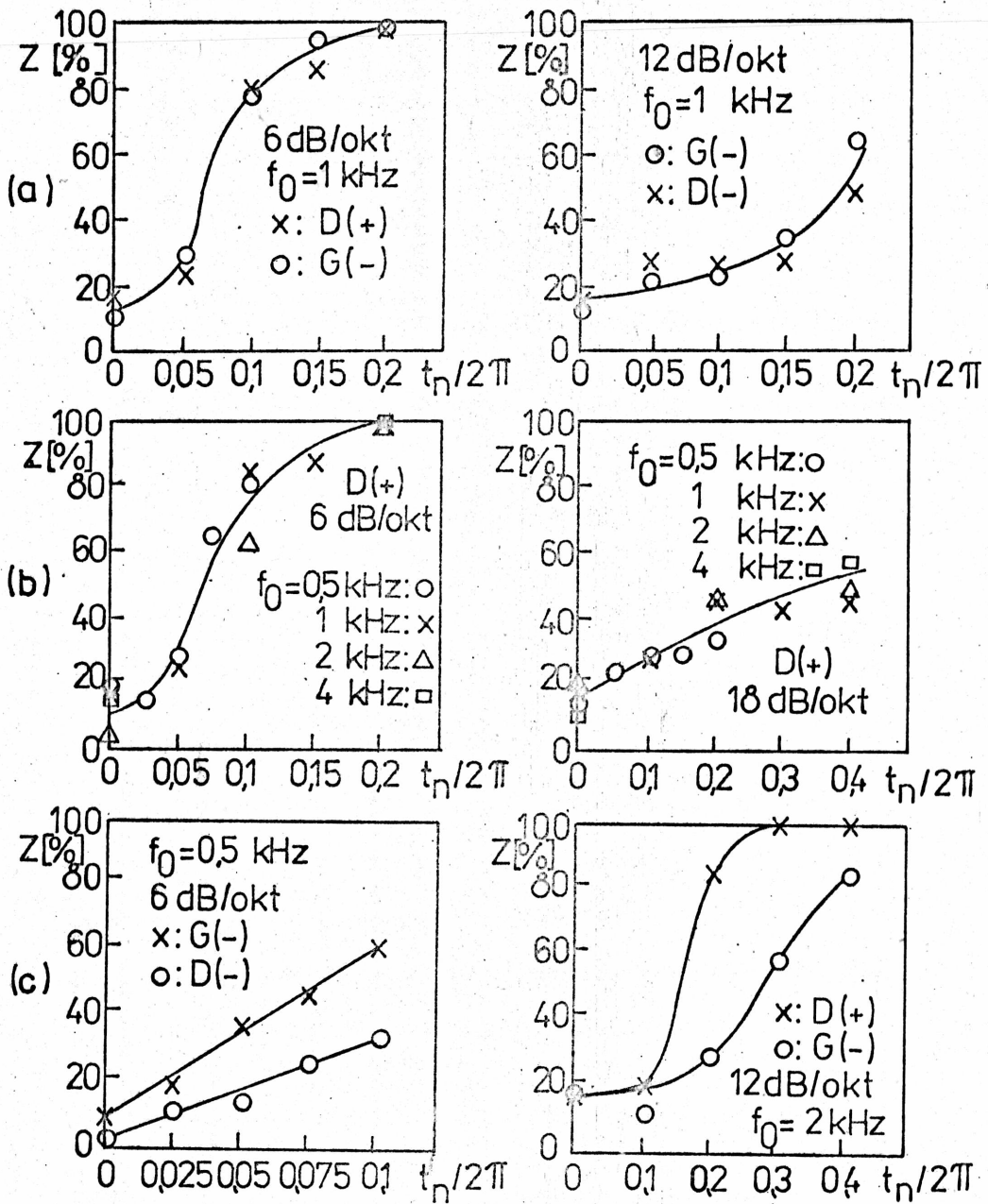
### 3.2.2. Pomiary przy użyciu modelu zestawu

Pomiary przeprowadzono metodą SB - słuchacz odpowiadał, czy zauważa różnicę pomiędzy dwoma fragmentami muzycznymi W i B<sub>j</sub>. Pomiary wykonano w "nowym" studio odsłuchowym, brała w nim udział dziewięcioosobowa grupa słuchaczy. Badania przeprowadzono dla 4 częstotliwości rozdziału /500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz/, trzech nachyleń charakterystyk filtrów /6, 12 i 18 dB/okt/, dwóch sposobów dodawania sygnałów /fazy zgodne i przeciwne/ oraz dwóch rodzajów opóźnień (D i G). W sumie uzyskano 48 krzywych psychometrycznych, każdą dla pięciu wartości opóźnienia  $t_n$ . Na każdy punkt pomiarowy przypadało około 50 odpowiedzi, w sumie zarejestrowano ponad 12 000 odpowiedzi słuchaczy.

Wyniki pomiarów poddano analizie, która pozwoliła ustalić prawidłowości i zredukować nadmiar informacji.

Na rys. 3.3 przedstawiono przykładowe krzywe psychometryczne, które posłużą do omówienia analizy wyników pomiarów. Na osi rzędnych podana jest zauważalność w procentach, na osi odciętych opóźnienie  $t_n$  /dzielnik  $2\pi$  został wprowadzony dla ułatwienia przejścia z  $t_n$  na rzeczywiste opóźnienie  $\tau$  przy danej pulsacji rozdziału  $\omega_0$ /.

Porównując między sobą krzywe psychometryczne zmierzone dla układów o identycznych charakterystykach amplitudowych



Rys. 3.3. Zauważalność zniekształceń w funkcji znormalizowanego opóźnienia: a/ porównanie zauważalności dla układów o jednakowych charakterystykach amplitudowych, b/ porównanie zauważalności przy różnych częstotliwościach rozdziału, c/ porównanie zauważalności przy różnych sposobach połączenia głośników: w fazie zgodnej (+) i w przeciwnej (-).



/lecz różnych charakterystykach opóźnienia grupowego/ - wzory (2.42) , (2.43) stwierdzone, że przebiegi ich są bardzo zbliżone /rys. 3.3a/. Spostrzeżenie to zweryfikowano metodami statystyki matematycznej. Metodą Brandta - Snedecora [52] testowano dla każdej pary hipotezę, iż obie krzywe z pary nie różnią się. Następnie zastosowano test testów [25] dla wszystkich par łącznie. W obu przypadkach wyniki wskazują, że decyzja o odrzuceniu hipotezy o zgodności krzywych byłaby obarczona dużym prawdopodobieństwem popełnienia błędu pierwszego rodzaju /w przypadku testu testów 99%/. Zgodnie z zasadami wnioskowania statystycznego nie można jednak bezkrytycznie przyjąć tej hipotezy, gdyż nie jest znane prawdopodobieństwo popełnienia błędu drugiego rodzaju. Przyjęcie hipotezy o zgodności krzywych psychometrycznych wyznaczonych dla zestawów o jednakowych charakterystykach amplitudowych lecz różnych charakterystykach opóźności oznaczałoby, że charakterystyka opóźności /a tym samym i fazowa/ są nieistotne w przypadku występujących równocześnie zniekształceń amplitudowych i fazowych. Jakkolwiek opublikowano wiele prac wskazujących, że w określonych warunkach zniekształcenia fazowe sygnału są percypowane [17,20,27,39,54], to jednocześnie istnieją wątpliwości, co do zauważalności przez słuchaczy zniekształceń fazowych w przypadku równoczesnego występowania zniekształceń amplitudowych [9,28,30,55] . Badania Blauerta i Lawsa [13] wskazują, że zniekształcenia opóźnieniowe w przetwornikach elektroakustycznych mogą być zauważalne, lecz w większości przypadków nie osiągają one wartości progowej, której minimalna wartość wynosi około 1 ms przy  $f = 2000$  Hz. Jak widać z rys. 3.3 zauważalność osiąga wartość progową przy opóźnieniach rzędu 50  $\mu$ s do 400  $\mu$ s /w zależności od  $\omega_0$ /. Przy takich wartościach opóźnień wartości funkcji  $T_{gr}$  z tabeli 2.1 nie osiągają wartości progowej zauważalności zniekształceń opóźnieniowych podanej w pracy [13] .

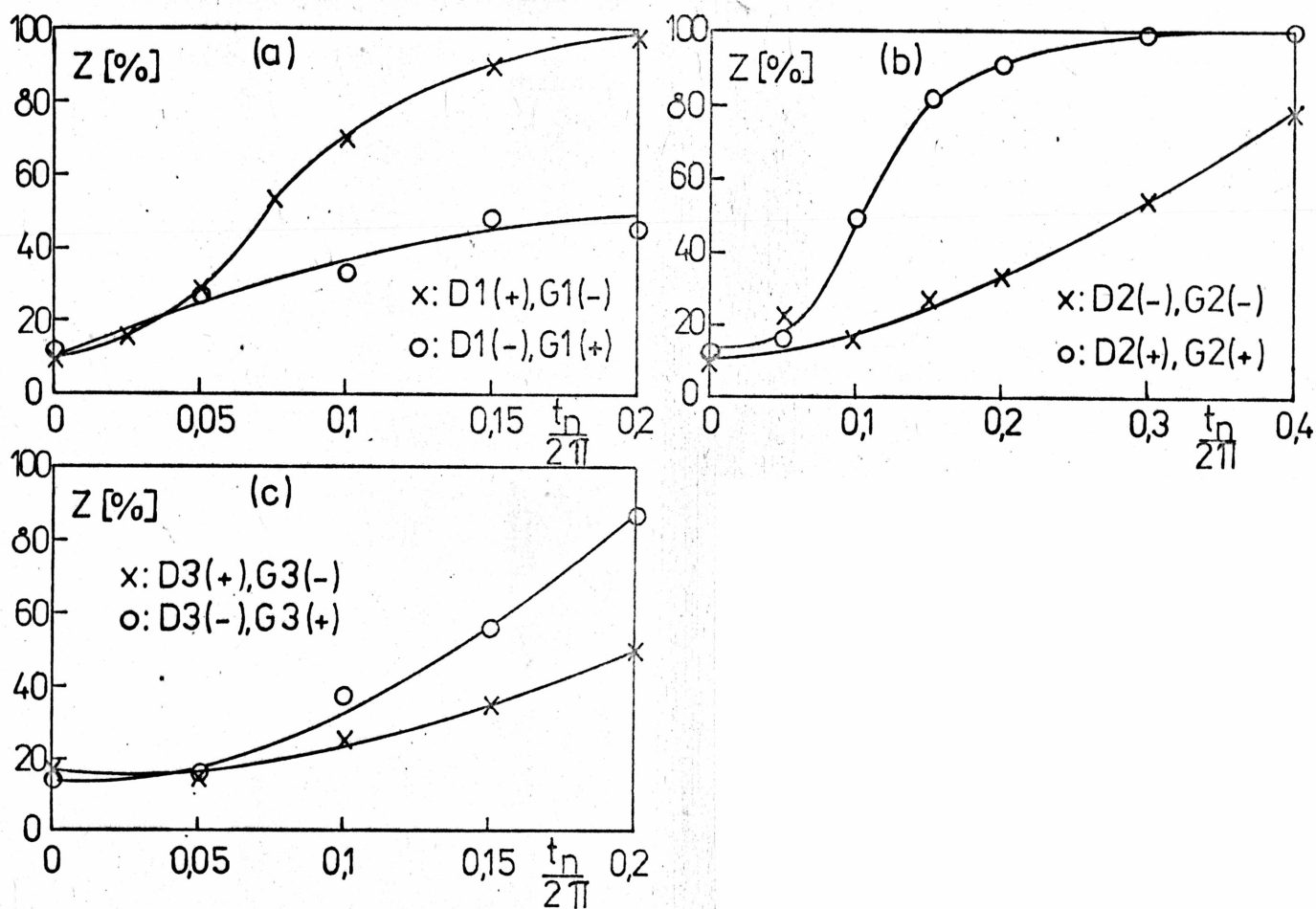
Na podstawie analizy statystycznej wyników eksperymentu

i danych literaturowych można zatem stwierdzić, że zniekształcenia sygnału, wywołane różnicą odległości od głośników niskotonowego i wysokotonowego do słuchacza, są zauważalne przez słuchaczy na skutek zmian widma amplitudowego sygnału. Wpływ zmian widma fazowego sygnału, wywołanych zmianami charakterystyki fazowej /i opóźnienia grupowego/ jest pomijalny w stosunku do wpływu zmian widma amplitudowego.

Analiza zależności zauważalności zniekształceń od częstotliwości rozdziału wskazuje, że dla danego typu zwrotnicy zauważalność zależy od opóźnienia  $t_n$  czyli od iloczynu opóźnienia rzeczywistego  $\tau$  i pulsacji rozdziału  $\omega_0$ . Ponieważ wzrost częstotliwości rozdziału przy danym opóźnieniu rzeczywistym powoduje proporcjonalny wzrost opóźnienia  $t_n$ , rośnie również zauważalność. Wynika stąd, że bardziej krytyczne są warunki pracy zestawu o dużej częstotliwości rozdziału. W najgorszym z przebadanych przypadków (D1(+),  $f_0 = 4 \text{ kHz}$ ) 50% słuchaczy zauważało różnicę przy opóźnieniu  $\tau = 15 \mu\text{s}$ , co odpowiada różnicy odległości od głośnika niskotonowego i wysokotonowego do słuchacza równej 0,5 cm /rys.3.3b/.

Stwierdzenie, iż zauważalność zależy od charakterystyki amplitudowej, oraz że przy danej charakterystyce amplitudowej zauważalność jest funkcją opóźnienia znormalizowanego pozwoliło przedstawić wszystkie wyniki pomiarów w postaci sześciu krzywych psychometrycznych /rys.3.4/. Każda z krzywych przedstawia zauważalność dla jednej postaci modułu transmitancji układu, uśrednioną na podstawie wyników pomiarów przy wszystkich częstotliwościach rozdziału.

Analiza zauważalności zniekształceń od sposobu przyłączenia głośników pokazuje, że zauważalność jest większa w przypadkach, gdy w wyrażeniu na moduł funkcji transmitancji występuje znak minus /rys.3.3c/. Inaczej mówiąc, w przypadku modułów funkcji transmitancji, w których występuje pod pierwiastkiem różnica, dany przyrost bodźca powoduje większy przyrost wrażenia, niż gdy pod pierwiastkiem w wyrażeniu na



Rys.3.4. Zbiorcze krzywe zauważalności dla zestawów z filtrami Butterwortha: a/ pierwszego rzędu, b/ drugiego rzędu, c/ trzeciego rzędu.

moduł transmitancji jest suma. W omawianych badaniach porównywano sygnały transmitowane przez układy o różnych transmitancjach, a więc fizyczną miarą przyrostu bodźca była zmiana transmitancji układu, a właściwie jak to wyżej wykazano moduł transmitancji. Zgodnie z prawem Webera-Fechnera [45] wrażenie jest proporcjonalne do logarytmu bodźca, czyli fizyczną miarą wrażenia jest funkcja

$$y_{(+)} = K \lg [1 + W(\omega_n) \sin \omega_n t_n] \quad (3.4)$$

dla transmitancji ze znakiem plus, oraz

$$y_{(+)} = K \lg [1 - W(\omega_n) \sin \omega_n t_n] \quad (3.5)$$

dla transmitancji ze znakiem minus. W wyrażeniach tych  $K$  jest stałą liczbową a  $W(\omega_n)$  funkcją wagową (2.104), przy czym

$$0 \leq W(\omega_n) \leq 1 \quad (3.6)$$

Miarą wrażliwości na zmiany bodźca jest nachylenie krzywych danych równaniami (3.4) i (3.5). Stosunek tych nachyleń dany jest wyrażeniem

$$\frac{y'_{(+)}}{y'_{(-)}} = \frac{W(\omega_n) \sin \omega_n t_n - 1}{W(\omega_n) \sin \omega_n t_n + 1} < 1 \quad (3.7)$$

Jak widać, nachylenie dla charakterystyk ze znakiem minus jest zawsze większe, niż dla charakterystyk ze znakiem plus.

Należy zauważyć, że zastosowanie prawa Webera-Fechnera do interpretacji zjawiska nie świadczy o jego ilościowej stosowalności w omawianym przypadku. Rozważany był stosunek nachyleń miar bodźca, a prawo Webera-Fechnera, jak każde inne przekształcenie monotoniczne, nie zmienia znaku ilorazu pochodnych.

Z punktu widzenia teorii skalowania [16] stwierdzenie, że zauważalność zależy od rodzaju charakterystyki amplitudowej układu, jest równoważne utworzeniu skali nominalnej. Stwierdzenie, że dla danego typu charakterystyki amplitudowej zauważalność zależy od znormalizowanego opóźnienia  $t_n$  wprowadza jednoznaczność skali nominalnej dzięki zastąpieniu wszystkich charakterystyk o różnych wartościach  $\omega_0$  i  $\tau$ , dla których zauważalność była jednakowa i jednakowy był iloczyn  $\omega_0 \tau = t_n$ , przez jedną charakterystykę zależną od  $t_n$ . Porównanie zauważalności dla różnych typów charakterystyk pozwoliło stwierdzić, że jest możliwe stworzenie skali po-

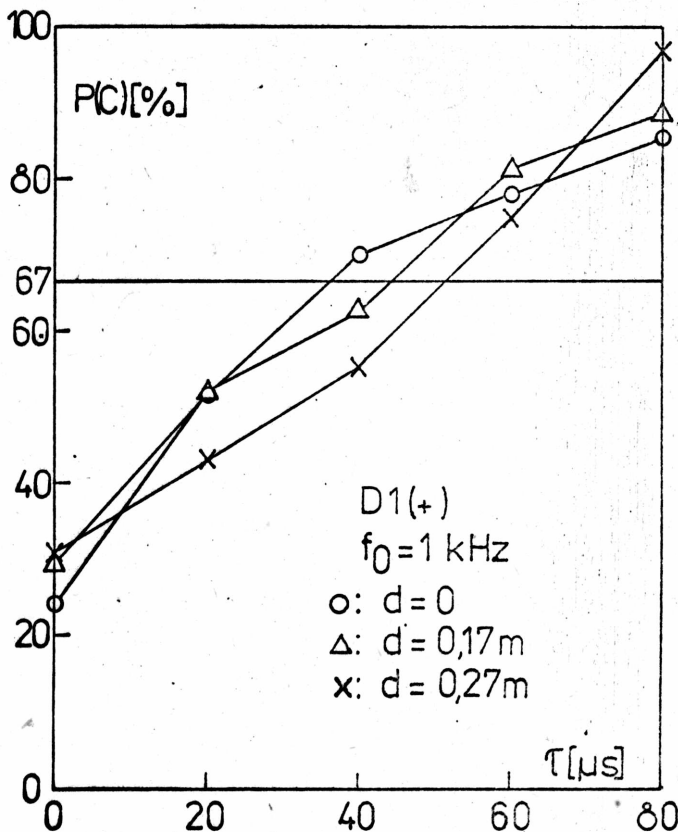
rzędkowej zauważalności w oparciu o postać funkcyjną charakterystyk (2.39) i (2.40), lub ich przekształcenia monotoniczne. Skala nominalna i porządkowa pozwalające klasyfikować i szeregować urządzenia, nie dają podstaw do ilościowych przewidywań zauważalności zniekształceń w przypadku innych, niż zbadane, charakterystyk amplitudowych. Próba stworzenia skali ilorazowej, pozwalającej realizować ten cel w odniesieniu do przewidywania progu zauważalności, przedstawiona jest w rozdziale 4.4.

### 3.2.3. Weryfikacja badań modelowych

Jak już powiedziano wcześniej, z punktu widzenia właściwości fizycznych stosowany model zestawu dzieli od zestawu rzeczywistego przebieg jego charakterystyki mocowej. Z punktu widzenia odbiornika, jakim jest organ słuchu człowieka, występuje jeszcze jedna różnica, związana z właściwościami kierunkowymi i zdolnością lokalizacji źródła dźwięku przez człowieka. Mimo, że w danym punkcie pola akustycznego charakterystyki częstotliwościowe ciśnienia będą identyczne w przypadku zestawu i jego modelu, to słuchacz dysponuje potencjalną możliwością dokonania rozróżnienia pomiędzy obydwojema nadajnikami na bazie zdolności lokalizacyjnych.

Pomiary porównawcze dla zestawu i jego modelu przeprowadzono w komorze bezpogłosowej, aby wyeliminować wpływ charakterystyk mocowych. Metodą 3APW badano zauważalność zniekształceń dla przypadku D1(+) (opóźniana małowartościowa część widma sygnału, nachylenie charakterystyk filtrów 6 dB/okt, sygnały sumowane w jednakowej fazie), przy częstotliwości rozdziału  $f_0 = 1$  kHz. Zmierzono krzywe psychometryczne dla trzech przypadków: zestawów rzeczywistych z głośnikami umieszczonymi pionowo jeden nad drugim w odległościach  $d = 0,27$  m i  $d = 0,17$  m oraz modelu zestawu ( $d=0$ ). Głośniki w zestawie były tak dobrane, że praktycznie ich charakterystyki były jednakowe, w modelu stosowano jeden z tych głośników. Słuchacz siedział na krześle z oparciem dla głowy. Odległość od jego

uszu do każdego z głośników zestawu była jednakowa. Wyniki pomiarów przedstawione są na rys. 3.5. Jak widać, przebieg wszystkich trzech krzywych jest zbliżony, przy czym widać tendencję do wzrostu wartości progowej /zmniejszenia zauważalności/ ze wzrostem rozstępu głośników  $d$ .



Rys.3.5. Zauważalność przy różnych odległościach pomiędzy głośnikami.

Dla próby wyjaśnienia tego trzeba bardziej szczegółowo przedstawić specyfikę eksperymentu. Przy pomiarach z modelem słuchacz porównuje brzmienie fragmentów muzycznych /w szczególności barwę i głośność/. Słuchacz musi dobrze zapamiętać brzmienie całego fragmentu. W przypadku zestawów rzeczywistych dochodzi jeszcze lokalizacja pozornego źródła, powstałego z połączenia sygnałów docierających z poszczególnych głośników. Zgodnie z prawem pierwszego frontu falowego [18] miejsce wystąpienia pozornego źródła jest uzależnione od



wzajemnych opóźnień sygnałów z poszczególnych głośników. W tym przypadku jest więcej informacji dla porównania, zauważalność powinna więc być większa dla większej odległości pomiędzy głośnikami. Jeśli jednak uwzględnić, że badane są zjawiska progowe, gdzie słuchacz musi się maksymalnie skoncentrować, to zwiększenie ilości informacji niewiele daje. Zwrócenie uwagi dodatkowo na lokalizację powoduje zmniejszenie koncentracji uwagi na brzmieniu i w sytuacji, gdy próg różnicowy dla lokalizacji będzie większy (a trzeba zauważyć, że przy badanych rozstawach głośników i odległości odsłuchu wynoszącej 2 m zmiany położenia źródła znajdują się w obszarze nieostrości lokalizacji), może to spowodować ogólne zmniejszenie zauważalności.

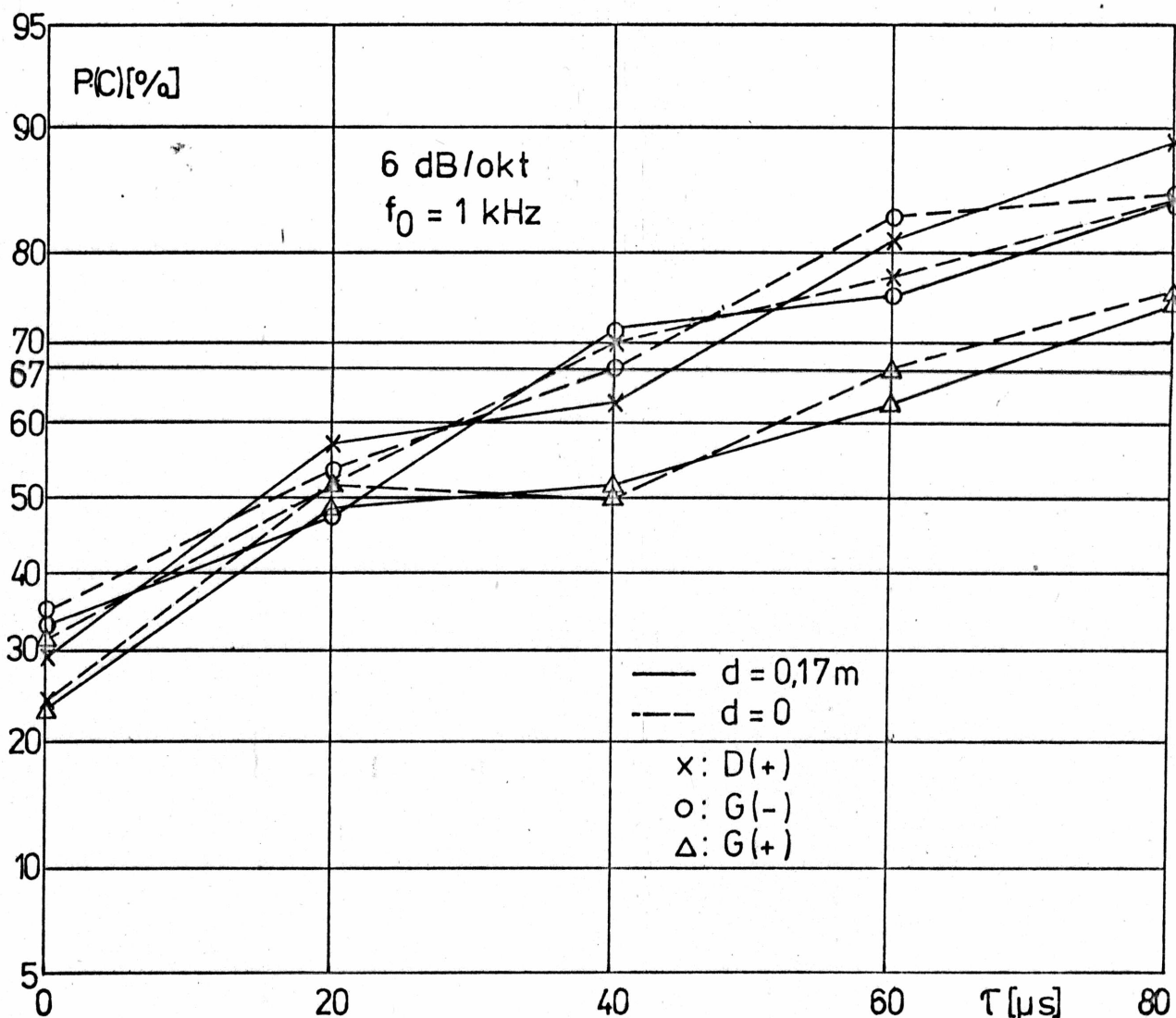
Najistotniejszym wnioskiem z przedstawionego eksperymentu jest stwierdzenie, że zauważalność dla  $d > 0$  nie przewyższa zauważalności dla  $d = 0$ . W zastosowaniach praktycznych wyników badań nie wystąpi zatem przypadek, że w rzeczywistym zestawie zniekształcenia będą słyszalne, mimo iż według projektu opartego o badania modelowe nie powinno ich być. Z kolei różnica pomiędzy wartościami progowymi jest tak mała (15  $\mu$ s odpowiada odległości 0,5 cm), że wyniki dla  $d = 0$  można również stosować dla występujących w rzeczywistości odległości pomiędzy głośnikami.

Dalsze badania porównawcze prowadzono z zestawem o rozstawie głośników  $d = 0,17$  m.

Wpływ charakterystyki mocowej zestawu może być istotny z punktu widzenia ilościowych wyników badań zauważalności, należy również sprawdzić, czy stwierdzone uprzednio prawidłowości nie są jego wynikiem. To ostatnie wydaje się istotne zwłaszcza w przypadku stwierdzonej pomijalności znaczenia charakterystyki fazowej. Należy wyjaśnić, czy rzeczywiście, jak na to wskazują rozważania z rozdziału 3.2.2, charakterystyka fazowa nie ma wpływu na zauważalność ze względu na dominującą rolę charakterystyki amplitudowej, czy też nie ma wpływu charakterystyki fazowej wskutek decydującej roli charakterystyki mocowej w procesie zauważalności zniekształceń

Jeżeli decydowałaby charakterystyka mocowa, związana z polem rozproszonym, to oczywisty byłby brak znaczenia charakterystyki fazowej.

W celu wyjaśnienia, czy pomijalny wpływ charakterystyki fazowej na zauważalność wynika z dominującej roli charakterystyki amplitudowej, czy mocowej, część pomiarów zauważalności powtórzono w komorze bezpogłosowej. Metodą 3APW zbadano zauważalność zniekształceń dla przypadków D1(+) i G1(-) przy  $d = 0$  oraz  $d = 0,17m$ . Częstotliwość rozdziału wynosiła 1000 Hz.



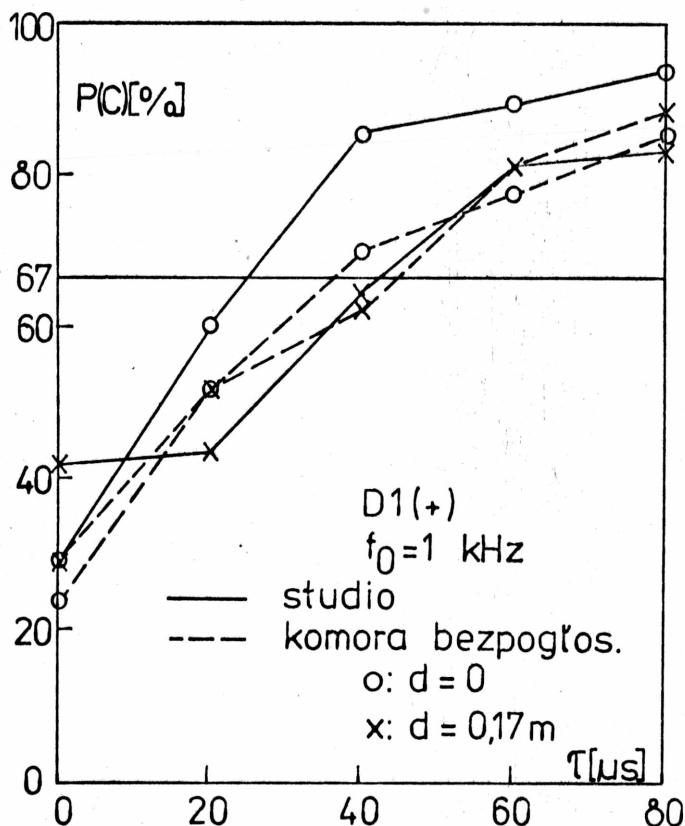
Rys.3.6. Krzywe psychometryczne zauważalności zmierzone w komorze bezpogłosowej.

Jak widać z wyników, podanych na rys. 3.6, również w przypadku wyeliminowania pola rozproszonego, krzywe zauważalności dla układów o jednakowych charakterystykach amplitudowych pokrywają się.

Na rys. 3.6 przedstawiono również wyniki badań zauważalności dla układu  $G1(+)$   $d = 0$  oraz  $G1(+)$   $d = 0,17m$  ( $f_0=1kHz$ ). Para krzywych psychometrycznych dla tego przypadku (charakterystyki amplitudowe ze znakiem plus) przebiega poniżej czterech krzywych dla układów o transmitancjach z różnicą w module. Analiza wariancji dla sześciu wartości progowych z rys. 3.6 wykazała istotność statyczną różnicy wartości progowych dla dwóch grup krzywych na poziomie  $\alpha = 0,01$ . Potwierdza to wniosek związany z równaniem (3.7) również dla braku oddziaływania pola rozproszonego.

W celu określenia wpływu pola rozproszonego (charakterystyki mocowej) zestawu na zauważalność porównano wyniki pomiarów w studio (rys.3.7 linia ciągła) i w komorze bezpogłosowej (linia przerywana) dla modelu (kółka) i rzeczywistego zestawu ( $d = 0,17m$ , krzyżyki). Częstotliwość rozdziału wynosiła 1 kHz, a więc zgodnie z wynikami rozważań z rozdziału 2.2.2 dla odległości  $d = 0,17m$  głośniki w zestawie rzeczywistym promieniowały jako źródło niezależne.

Jak widać na rys. 3.7 krzywa dla  $d = 0$ , zmierzona w studio, przebiega wyżej niż pozostałe trzy krzywe wyznaczone przy  $d = 0,17m$ . Oznacza to istotny wpływ charakterystyki pola rozproszonego na zauważalność badanych zniekształceń. Oznacza to równocześnie, że wyniki uzyskane w pomiarach z modelem faktycznie uzyskano w warunkach najbardziej krytycznych. Wartość progowa uzyskana w nich nie zostanie przekroczona nawet w przypadku dowolnie małej odległości pomiędzy głośnikami czy najniższej częstotliwości rozdziału, a także gdy w zestawie zastosuje się linię opóźniającą.



Rys.3.7. Porównanie zauważalności zniekształceń zmierzonej w studio i w komorze bezpogłosowej.

### 3.3. Zauważalność zniekształceń przy transmisji stereofonicznej

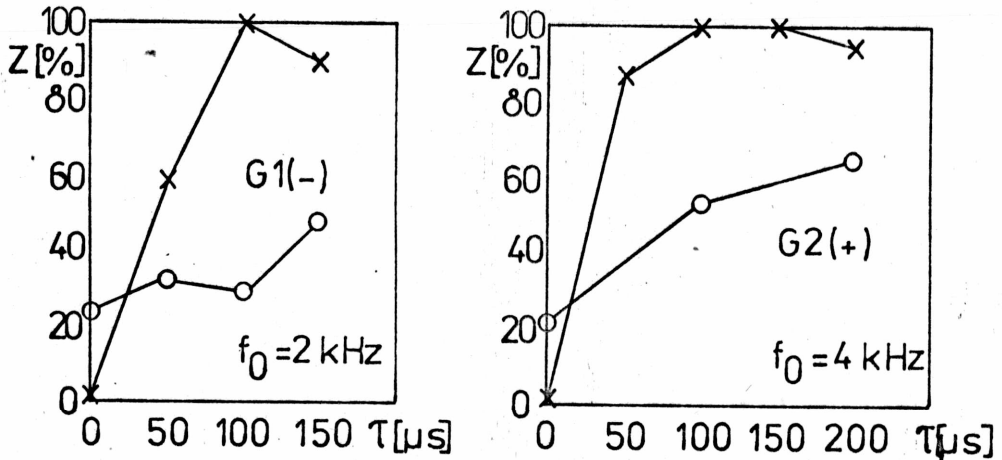
Zniekształcenia linearne, wywołane różnicą odległości od poszczególnych głośników w zestawie do słuchacza, powodujące zmianę brzmienia transmitowanych dźwięków, w przypadkach transmisji stereofonicznej mogą dodatkowo powodować zmiany przestrzennego rozkładu źródeł pozornych. Dla zbadania tego zjawiska przeprowadzono pomiary wykorzystując dwukanałowy układ badawczy. Prawy kanał był taki sam, jak przedstawiony na rys. 3.2 dla pozycji przełącznika oznaczonej linią ciągłą. W lewym kanale zastosowano pojedynczy głośnik, w tym kanale nie wprowadzano zniekształceń. Obydwa kanały zasilano tym sa-

mym sygnałem muzycznym z testowej taśmy magnetycznej. W przypadku, gdy obydwie linie opóźniające nie wprowadzały opóźnień, sygnały z głośnika prawego i lewego były jednakowe i w rezultacie pozorne źródło było lokalizowane w środku. Gdy wprowadzono opóźnienie różnicowe do kanału prawego, następowało przemieszczenie pozornego źródła. Jeżeli badano układy których transmitancja jest sumą, pozorne źródło przesuwało się w prawo, jeśli opóźnienie wprowadzano do układu zawierającego różnicę w wyrażeniu na transmitancję, źródło pozorne przesuwało się w lewo. Wskazuje to na natężeniowy charakter transmisji, gdyż o położeniu źródła decydowała głośność sygnałów z obydwu torów, a nie opóźnienia. Gdyby decydowały opóźnienia, to przy wprowadzeniu opóźnień do prawego kanału pozorne źródło zawsze przemieściłoby się w stronę prawego głośnika.

Pomiary przeprowadzono metodą SB, zadaniem słuchacza była ocena położenia źródła pozornego, bez uwzględniania barwy dźwięku. Skoncentrowanie uwagi słuchaczy wyłącznie na lokalizacji osiągnięto przez odpowiednie sformułowanie pytania, słuchacze mieli oceniać, czy źródło pozorne, związane z sygnałem zniekształconym  $B_j$  znajduje się na lewo, czy na prawo od źródła, związanego z sygnałem wzorcowym  $W$ .

Wyniki pomiarów /przykłady na rys. 3.8/ wskazują, że zauważalność zniekształceń rozkładu przestrzennego źródeł wywołana zniekształceniami linearnymi jest mniejsza, niż zauważalność zmiany brzmienia transmitowanych dźwięków. Wypływa stąd wniosek praktyczny, że jeśli zestaw spełnia wymagania odnośnie do zauważalności zniekształceń w przypadku transmisji monofonicznej, to będzie on prawidłowo pracował również w układzie stereofonicznym.

Wyniki tego eksperymentu wiążą się ze stwierdzoną w rozdziale 3.2.3 mniejszą zauważalnością zmiany brzmienia dźwięku dla większych odległości  $d$  pomiędzy głośnikami. Jeżeli uwaga słuchaczy jest podzielona pomiędzy zauważanie zmiany brzmienia i zmiany lokalizacji, to wskutek mniejszej wrażliwości na zmiany lokalizacji ogólna zauważalność zmiany będzie mniejsza, niż gdy słuchacz koncentruje się jedynie na brzmieniach sygnałów.



Rys.3.8. Porównanie zauważalności zmiany brzmienia w układzie monofonicznym (krzyżki) z zauważalnością zmiany położenia pozornego źródła w układzie stereofonicznym (kółka) .

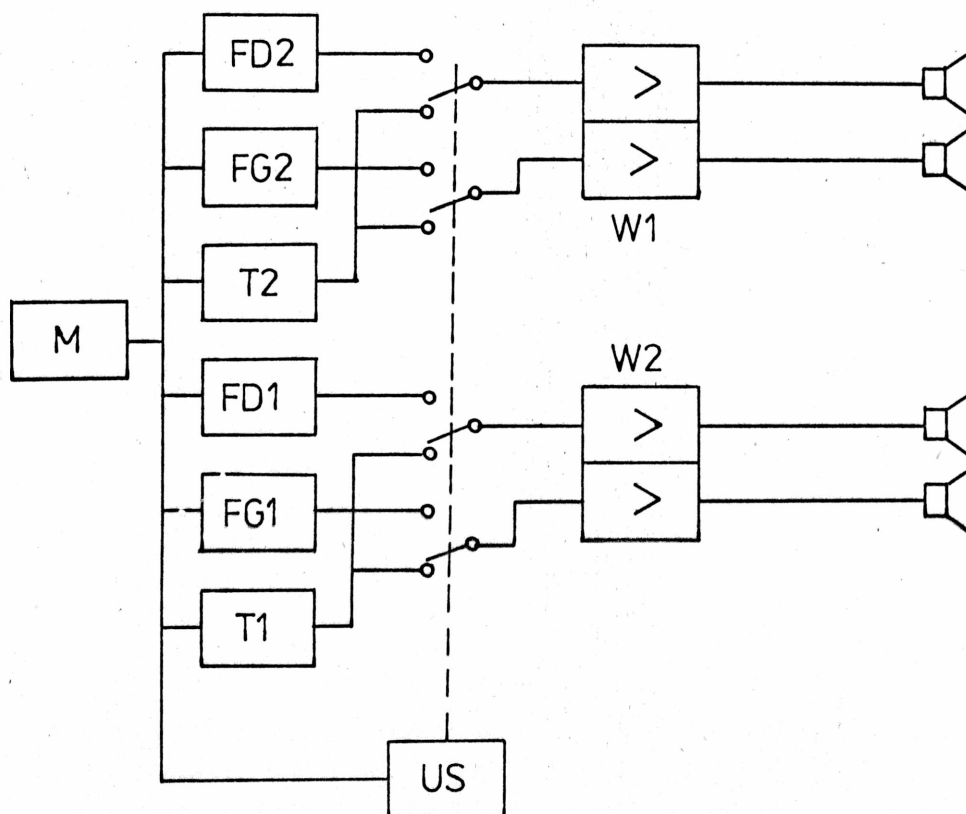
3.4. Badania wpływu rozmieszczenia głośników w zestawach na obszar odsłuchu stereofonicznego

W celu weryfikacji przedstawionych w rozdziale 2.3 rozważań na temat wpływu rozmieszczenia głośników w zestawach na natężeniowe wskaźniki lokalizacyjne, przeprowadzono eksperymenty psychoakustyczne. Miały one na celu stwierdzenie, czy rozważania teoretyczne znajdują odbicie w rzeczywistości oraz miały dostarczyć danych liczbowych do porównania ze znanymi z literatury układami zapewniającymi powiększenie stereofonicznego obszaru odsłuchowego.



### 3.4.1. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy przedstawiony jest na rys. 3.9. Przełącznik elektroniczny, sterowany sygnałem fonicznym z taśmy magnetycznej, przyłącza na zmianę wejścia wzmacniaczy do



Rys.3.9. Układ do pomiaru natężeniowego wskaźnika lokalizacyjnego: M-magnetofon, T-tłumik, FD, FG-filtry, US-urządzenie sterujące, W-wzmacniacz dwukanałowy.

wyść filtrów lub tłumików. Na taśmie magnetycznej nagrane są parami fragmenty muzyczne. Gdy odtwarzany jest pierwszy fragment z pary, przełącznik łączy wejścia wzmacniaczy z wyjściami filtrów - odpowiada to odtwarzaniu dźwięku przez zestawy dwudrożne. Przy odtwarzaniu drugiego fragmentu

z pary sygnał przechodzi przez tłumiki. Do wyjść wzmacniaczy mocy podłączone są w jednakowej fazie cztery głośniki, umieszczone parami w dwóch identycznych obudowach. Głośniki w obudowach umieszczone są na jednakowej wysokości, odległość, d pomiędzy nimi wynosiła 27 cm. Pomiary wykonywano w "nowym" studio odsłuchowym. Długość bazy stereofonicznej wynosiła 2,5 m, odległość odsłuchowa 2.16 m /w przypadku umieszczenia słuchacza na osi symetrii układu cały układ tworzy trójkąt równoboczny o boku długości 2,5 m/. Słuchacz siedzący na krześle z podpórką pod głową, przemieszczony był o 10 cm w bok od osi symetrii układu odsłuchowego. Wartość przemieszczenia została dobrana eksperymentalnie. Przemieszczenie nie mogło być zbyt duże, gdyż źródło pozorne przesunęłoby się zbyt daleko w stronę bliższego słuchaczowi zestawu lub w krańcowym przypadku pokryłoby się z nim. Przy tak dobranej wartości przesunięcia pozornego źródła od środka wynosi około jednej czwartej długości bazy.

Gdy sygnał przechodzi przez filtry, do każdego głośnika dociera tylko część jego widma, przepuszczona przez filtr. Jeśli natomiast sygnał nie przechodzi przez filtry, każdy z głośników umieszczonych w obudowie promieniuje pełne widmo sygnału. Natężenie dźwięku jest wówczas dwukrotnie większe. W celu wyrównania głośności sygnałów wzorcowego i badanego wprowadzono odpowiednie tłumienie podstawowe tłumików  $T_1$  i  $T_2$ . Zadaniem słuchaczy było stwierdzenie, czy pozorne źródło wytworzone przez sygnały przechodzące przez tłumik jest na lewo czy na prawo od pozornego źródła, wytworzonego przez sygnały przechodzące przez filtry. Położenie pozornego źródła wytworzonego przez sygnały przechodzące przez tłumiki było zmieniane w sposób losowy przez regulację tłumienia w torze.

### 3.4.2. Wyniki i wnioski

W przedstawionym eksperymencie psychoakustycznym słuchacze porównywali położenie dwóch źródeł pozornych:

pierwszego, wytworzonego przez układ odsłuchowy złożony z zestawów dwudrożnych o charakterystykach kierunkowości danych wzorami (2.29) lub (2.30) i drugiego, wytworzonego przez zestawy dwugłośnikowe, których charakterystyka kierunkowości dana jest następującą zależnością:

$$D = \cos \left( \frac{\omega n^t n}{2} \sin \psi \right) \quad (3.8)$$

Jak łatwo sprawdzić, dla małych wartości kąta  $\psi$ , dla których może przyjąć warunek (2.96) natężeniowy wskaźnik lokalizacyjny  $R$  układu odsłuchowego złożonego z zestawów o charakterystykach kierunkowości danych równaniem (3.8) jest równy zeru. Czasowy wskaźnik lokalizacyjny, wyznaczony przez różnicę odległości od zestawów, jest jednakowy dla obu układów odsłuchowych. Zatem wartość zmiany tłumienia, którą trzeba wprowadzić przy odtwarzaniu przez zestawy dwugłośnikowe, aby położenia źródeł pozornych pokryły się, jest równa natężeniowemu wskaźnikowi lokalizacyjnemu występującemu w układzie złożonym z zestawów dwudrożnych. W tabeli 3.1 podane są wyznaczone drogą pomiaru psychoakustycznego wartości natężeniowego wskaźnika lokalizacyjnego układów odsłuchowych złożonych z zestawów dwudrożnych ze zwrotnicami różnych rodzajów. Słuchacze znajdowali się bliżej lewego głośnika, a więc wskaźnik czasowy  $T$  miał wartość dodatnią. Jak widać z tabeli, w dwóch przypadkach (GDDG 6 dB/okt i DGGD 18 dB/okt) wyznaczony doświadczalnie wskaźnik natężeniowy ma wartość ujemną, czyli występuje kompensacja opóźnienia przez natężenie. W dwóch pozostałych przypadkach wskaźniki  $R$  i  $T$  mają taki sam znak, a więc wzrastało przesunięcie pozornego źródła wywołane przemieszczeniem słuchacza od osi układu odsłuchowego. Wyniki te potwierdzają wnioski z rozważań teoretycznych podanych w rozdziale poprzednim.

Jak widać z tabeli, wpływ charakterystyk kierunkowości zestawach dwudrożnych uwidacznia się dla częstotliwości rozdziału począwszy od 1 kHz. Dla małych częstotliwości rozdziału zmiana charakterystyki amplitudowej przy wybranym

kącie  $\psi$  była zbyt mała, żeby wpływać na lokalizację. Porównanie wartości wskaźników R odpowiadających sobie układów

Tabela 3.1

Wyznaczone w eksperymencie psychoakustycznym wartości natężeniowego wskaźnika lokalizacyjnego R dla różnych zestawów dwudrożnych, czasowy wskaźnik lokalizacyjny  $T > 0$ , głośniki przyłączone w jednakowej fazie

| Ustawienie głośników | Nachylenie charakterystyk filtrów dB/okt | Wartość wskaźnika R dB przy równej $f_0$ równej: |       |       |       |
|----------------------|--|--|-------|-------|-------|
|                      |  | 0,5 kHz  | 1 kHz | 2 kHz | 4 kHz |
| GDDG                 | 6  | 0,1  | -1,8  | -3    | -4,1  |
| DGGD                 | 6  | -0,1   | 2,0   | 2,5   | 3     |
| GDDG                 | 18                                       | -  | 0     | 1     | 0,8   |
| DGGD                 | 18                                       | -  | -2,5  | -2,2  | -2,7  |

odsłuchowych z filtrami o różnych nachyleniach wskazuje, że wartość R maleje przy wzroście nachylenia. Wynika to ze zwężenia zakresu interferencji w układzie trzeciego rzędu. Podane w tabeli 3.1 wartości liczbowe wskaźnika R uzyskano dla jednej wartości odległości pomiędzy głośnikami w zestawach odsłuchowych i jednego przemieszczenia słuchacza od osi głównej. Wystarcza to do potwierdzenia generalnej tezy rozdziału 2.3 o istotności rozmieszczenia głośników w zestawach wchodzących w skład stereofonicznego układu odsłuchowego. Wystarcza również dla porównania układów wskazanych tu jako optymalne, z podawanymi w literaturze jako mającymi powiększać pole odsłuchu stereofonicznego. Typowym przedstawicielem takich układów jest układ odsłuchowy Bauera, złożony z zestawów o ósemkowych charakterystykach kierunkowości ustawionych w taki sposób, że osie zestawów przecinają się przed słuchaczem. Natężeniowy wskaźnik lokalizacyjny dla układu Bauera można wyrazić następującym wzorem:

$$R(\psi) = 20 \lg \frac{1 - \operatorname{tg} \psi' \operatorname{tg} \psi}{1 + \operatorname{tg} \psi' \operatorname{tg} \psi} \quad (3.9)$$

przy czym kąt  $\psi'$  jest wstępnym przemieszczeniem osi zestawów w odniesieniu do punktu umieszczonego na osi układu. Gdyby zestawy były ustawione tak, żeby ich osie były skierowane na punkt odsłuchu, kąt  $\psi'$  byłby równy zeru i wskaźnik  $R$  byłby też równy zeru. Dlatego warunkiem właściwego działania układu złożonego z zestawów o charakterystykach ósemkowych jest, aby osie zestawów przecinały się przed słuchaczem. Im większy jest kąt  $\psi'$  tym większa wartość wskaźnika  $R(\psi)$ . Kąta  $\psi'$  nie można jednak zwiększać nieograniczenie, przy

$$\psi' = \frac{\pi}{4} \quad (3.10)$$

kątowy zakres kompensacji jest największy dla przemieszczenia w prawo i w lewo od osi układu. Jak widać z tabeli 3.1 zmierzone wartości wskaźnika natężeniowego dla układów kompensujących przy  $T > 0$  wynoszą od 1.8 do 4.1 dB. Na podstawie wzoru (3.9) można wyliczyć kąt  $\psi$ , o który należy przemieścić słuchacza, aby przy warunku (3.10) i  $T > 0$  wartość wskaźnika  $R$  wynosiła - 2 dB.

Wynosi ona

$$\psi = - 7^\circ \quad (3.11)$$

Dla porównania wartość kąta, o który był przemieszczony słuchacz była równa

$$\psi = - 2^\circ \quad (3.12)$$

Widać zatem, że dla osiągnięcia tego samego przyrostu wskaźnika natężeniowego układ Bauera wymaga większego przemieszczenia słuchacza, a zatem będzie on gorzej kompensował zmiany wskaźnika czasowego. Pozorną przewagę daje układowi Bauera możliwość kompensacji w szerszym zakresie kątów - teoretycznie  $\pm 45^\circ$ . W rzeczywistości kompensacja w tak szerokim zakresie kątów jest niemożliwa. W warunkach odsłuchu sygnałów

o właściwościach dynamicznie zmieniających się w czasie, decydującą rolę w lokalizacji źródeł pozornych mają na przemian wskaźniki natężeniowe lub czasowe - w zależności od tego, czy dźwięk ma charakter bardziej impulsowy, czy bardziej zbliżony do przebiegów ustalonych. W rezultacie przy dużych różnicach wskaźników natężeniowego i czasowego położenie pozornego źródła dźwięku zmieniałoby się w czasie, co nie jest równoważne kompensacji.



#### 4. OPTIMALIZACJA ROZMIESZCZENIA GŁOŚNIKÓW W ZESTAWIE GŁOŚNIKOWYM

Wyniki analizy elektroakustycznej i psychoakustycznej właściwości zestawów głośnikowych, przedstawione w rozdziałach drugim i trzecim stanowią podstawę do optymalizacji rozmieszczenia głośników w zestawie.

##### 4.1. Projekt rozmieszczenia głośników jako część składowa projektu zestawu

Zagadnienie optymalnego rozmieszczenia głośników w płycie czołowej zestawu jest jednym z etapów całej procedury projektowania urządzeń głośnikowych. Przy projektowaniu urządzeń głośnikowych można wyróżnić dwie zasadnicze sytuacje wyjściowe [43]. W pierwszej z nich zakłada się parametry urządzenia, a następnie określa się właściwości poszczególnych elementów. Prowadzi to do konstruowania głośników specjalnie do danego urządzenia. Ponieważ skonstruowanie dobrego głośnika jest kosztowne i czasochłonne, znacznie częściej występuje druga sytuacja: mając wybrane głośniki, należy tak dobrać pozostałe elementy urządzenia, aby uzyskać urządzenie (zestaw) o pożądanych właściwościach.

Właściwości głośnika, przeznaczonego do pracy w zakresie małych częstotliwości, oraz zadane dla tego zakresu częstotliwości parametry zestawu, decydują o objętości obudowy [60,63,66]. Kształt i wartość poszczególnych wymiarów obudowy wynikają z przesłanek ekonomicznych i estetycznych - koszt wykonania obudowy o prostych kształtach, np. prostopadłościanu jest niższy, niż przy kształtach skomplikowanych, współczesna estetyka narzuca wybór właśnie prostych kształtów, podkreślających funkcje urządzenia. Celowi temu służy również wybór odpowiednich proporcji obudowy. Oczywiście, przy określaniu wymiarów płyty czołowej musi być spełniony warunek podstawowy - muszą się na niej mieścić głośniki.

Charakterystyki skuteczności wybranych głośników oraz ich dopuszczalne moce narzucają wybór częstotliwości rozdziału zwrotnicy. Wybór filtrów, wchodzących w skład zwrotnicy, jest zdeterminowany dążeniem do osiągnięcia najbardziej równomiernej charakterystyki zestawu, mierzonej na osi głównej.

Największe możliwości dają tu filtry aktywne, jednak najczęściej stosuje się filtry pasywne, o charakterystykach Butterwortha.

Projektowanie rozmieszczenia głośników w płycie czołowej jest więc ostatnią fazą projektowania zestawu. W wyniku poprzednich faz znane są wymiary obudowy, typy zwrotnic i częstotliwości rozdziału oraz wiadomo, że charakterystyka zestawu mierzona na jego osi spełnia założone wymagania. Do określenia pozostaje optymalne rozmieszczenie głośników.

#### 4.2. Kryterium optymalizacji

Jak stwierdzono w rozdziale 2.1 sygnały docierające do słuchacza umieszczonego poza osią zestawu ulegają zniekształceniom linearnym. Zniekształcenia te powodują zmianę brzmienia sygnałów odtwarzanych przez zestaw, o ile przekroczą pewną wartość progową. W pewnym kącie bryłowym wokół osi zestawu zniekształcenia są niezauważalne.

Celem, do którego należy dążyć przy projektowaniu rozmieszczenia głośników jest maksymalizacja obszaru kąтового, w którym zniekształcenia są niezauważalne.

Umieszczenie głośników pionowo jeden nad drugim (kąt  $\delta = \frac{\pi}{2}$ ) wyeliminuje zniekształcenia w płaszczyźnie poziomej, jednocześnie wystąpią największe zniekształcenia w płaszczyźnie pionowej i odwrotnie, przy najlepszych właściwościach w płaszczyźnie pionowej, w płaszczyźnie poziomej zestaw będzie miał najgorsze charakterystyki.

Ponieważ słuchacz ma znacznie większe możliwości przemieszczania się w płaszczyźnie poziomej, niż pionowej, jako podstawowe kryterium optymalizacji przyjęto maksymalizację zakresu kąтового w płaszczyźnie poziomej. Zakres ten powinien

być symetryczny względem osi geometrycznej zestawu. Jeżeli osiągnie on pewną określoną wartość, np.  $\pm 30^\circ$ , powyżej której występują inne ograniczenia jakości transmisji, wywołane na przykład przebiegiem charakterystyk kierunkowości poszczególnych głośników, dalsze jego zwiększenie jest niecelowe. Wówczas należy zmaksymalizować zakres niezniekształconej transmisji w płaszczyźnie pionowej.

#### 4.3. Związek obszaru odsłuchu z geometrią zestawu

-----

Zgodnie z zależnościami (2.39) i (2.40) charakterystyka kierunkowości zestawu zależy od opóźnienia  $t_n$ , którego ogólna postać dana jest wzorem (2.38). Pomiarów psychoakustyczne pozwoliły stwierdzić, że zauważalność zniekształceń również zależy od tego parametru. Dla każdego rodzaju zwrotnicy wyznaczono dwie wartości progowe. Jedna odpowiada opóźnieniu małowłosotliwościowej części pasma ( $t_{npD}$ ), drugą zmierzono opóźniając część widma sygnału przechodzącą przez głośnik wysokotonowy ( $t_{npG}$ ). Aby zniekształcenia nie były słyszalne, słuchacz musi znajdować się w obszarze kątowym, w którym wartość opóźnienia  $t_n$  mieści się w granicach wyznaczonych przez  $t_{npD}$  i  $t_{npG}$ . W przyjętym jako ilustracja układzie głośników, z głośnikiem niskotonowym umieszczonym na lewo od głośnika wysokotonowego

$$-t_{npG} < t_n \leq t_{npD} \quad (4.1)$$

Znak minus przy  $t_{npG}$  pochodzi stąd, że w rozpatrywanym układzie  $t_n$  ma wartość dodatnią, gdy kąt  $\psi$  jest dodatni, zatem przy ujemnej wartości kąta  $\psi$ , która występuje gdy sygnały z głośnika wysokotonowego są opóźniane, wartość progowa musi być ujemna. Wstawiając wzór (2.38c) do nierówności (4.1) dostajemy następujący układ nierówności

$$-t_{npG} \leq \frac{(d \cos \delta \sin \varphi + h \cos \varphi) \omega_0}{c} \leq t_{npD} \quad (4.2)$$

W zależności tej uwzględniono ujemny znak przesunięcia  $h$ , wynikający z przyjętego układu współrzędnych (rys.2.2).

Powyższy wzór można wykorzystać zarówno do sprawdzenia, w jakim zakresie kąta  $\varphi$  charakterystyka zestawu nie różni się w sposób zauważalny słuchem od charakterystyki zmierzonej na osi geometrycznej zestawu, jak też do projektowania zestawów. Jeżeli na przykład zadane są wartości graniczne kąta  $\varphi$ , częstotliwość rozdziału  $f_0$ , typ zwrotnicy /a stąd wartości progowe  $t_{np}$ , oraz wynikające z konstrukcji głośników przesunięcie  $h$  oraz minimalny rozstaw głośników  $d_{min}$ , to korzystając z wzoru (4.2) można obliczyć dopuszczalną wartość kąta  $\delta$ . W innym przypadku, mając rozmieszczenie głośników narzucone wymiarami obudowy, czyli znając wartość  $d$  i  $\delta$  można obliczyć wymagane przesunięcie głośnika niskotonowego w kierunku osi  $Oz$  /wysokość pierścienia odstępczego/, aby zniekształcenia nie były zauważalne.

Przekształcając nierówności (4.2) otrzymujemy zależność pozwalającą porównać właściwości zestawu z głośnikami umieszczonymi w jednej płaszczyźnie  $h=0$  oraz gdy  $h \neq 0$

$$-t_{npG} - \frac{h \omega_0}{c} \cos \varphi \leq \frac{\omega_0 d \cos \delta \sin \varphi}{c} \leq t_{npD} - \frac{h \omega_0}{c} \cos \varphi \quad (4.3)$$

Jak widać, skręcenie osi promieniowania w stosunku do osi geometrycznej wpływa, poprzez zmianę wartości granicznych, na położenie obszaru kąтового nieznieskształconej transmisji względem osi geometrycznej. Aby obszar, w którym zniekształcenia nie są słyszalne, był symetryczny względem osi geometrycznej, powinien być spełniony warunek

$$\left| -t_{npG} - \frac{h \omega_0 \cos \varphi}{c} \right| = \left| t_{npD} - \frac{h \omega_0 \cos \varphi}{c} \right| \quad (4.4)$$

lub w innej formie:

$$t_{npD} - t_{npG} = \frac{2h \cos \varphi}{c} \omega_0 \quad (4.5)$$

Tak więc dla rozpatrywanego rozmieszczenia głośników (rys.2.2) zakres kątowy nieznieształconej transmisji jest najbardziej zbliżony do symetrycznego, gdy  $t_{npD}$  jest większe od  $t_{npG}$ . W przypadku przeciwnym obszar nieznieształconej transmisji przesuwają się i może nawet nie obejmować osi geometrycznej układu.

Jak stwierdzono w wyniku pomiarów, różnica

$$t_{npD} - t_{npG}$$

jest dodatnia dla zestawów zawierających filtry pierwszego rzędu i głośniki przyłączone w przeciwnej fazie oraz gdy zwrotnice z filtrami trzeciego rzędu mają głośniki przyłączone w jednakowej fazie. W tych przypadkach fakt, że głośnik niskotonowy jest cofnięty w stosunku do wysokotonowego, daje poprawę właściwości zestawu. Takie stwierdzenie jest sprzeczne z modą na umieszczenie głośników w płycie czołowej zestawu w taki sposób, aby ich "środki promieniowania" promieniowania znajdowały się w jednej płaszczyźnie. Daje to co prawda najbardziej równomierną charakterystykę fazową zestawu, ale charakterystyka ta odnosi się wyłącznie do osi zestawu, ponadto, jak stwierdzono w rozdziale 3.2, przebieg charakterystyki fazowej ma pomijalne znaczenie w stosunku do przebiegu charakterystyki amplitudowej. Dlatego też bardziej poprawne wydaje się, przedstawione wyżej, ujęcie zagadnienia wpływu różnicy w położeniu środków promieniowania głośników, wchodzących w skład zestawu na jego właściwości, oparte na dążeniu do maksymalizacji obszaru odsłuchu. Gdy zestaw zawiera filtry pierwszego rzędu i głośniki są podłączone w jednakowej fazie lub gdy w zestawie są filtry trzeciego rzędu a głośniki podłączone są w przeciwnej fazie, cofnięcie głośnika niskotonowego w głąb obudowy poprawia właściwości zestawu. Wówczas stosowanie pierścieni odstępczych jest celowe. W przypadku zwrotnic z filtrami rzędu parzystego wobec równości  $t_{npD}$  i  $t_{npG}$ , każde przemieszczenie wzajemnego położenia środków promieniowania zawęży obszar nieznieształconej transmisji. W tym przypadku najbardziej wskazana jest redukcja

przesunięcia  $h$  do zera.

#### 4.4. Wykorzystanie wyników badań zauważalności przy projektowaniu

Jak powiedziano wcześniej, celem pomiarów psychoakustycznych było uchwycenie prawidłowości, charakterystycznych dla zauważalności zniekształceń linearnych, spowodowanych różnicą odległości od poszczególnych głośników w zestawie do słuchacza. Dla grupy słuchaczy, uczestniczących w pomiarach, wyniki są znaczące zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym. Zastosowana metoda badawcza, a mianowicie analiza wyników pomiarów psychoakustycznych w oparciu o opis fizyczny bodźca, pozwala uważać wyniki badań za słuszne w sensie jakościowym nie tylko dla badanej grupy słuchaczy. Jednakże zagadnienie zastosowania parametrów zmierzonych krzywych zauważalności do projektowania wymaga pewnej ostrożności ze względu na niereprezentatywność grupy słuchaczy dla całej populacji użytkowników zestawów głośnikowych. W przypadkach, gdy celem badań jest uzyskanie danych liczbowych, stanowiących podstawę do normalizacji parametrów urządzeń wymagana jest znacznie większa liczba słuchaczy, reprezentujących różne środowiska [24]. Grupa słuchaczy, którzy brali udział w pomiarach byli to ludzie młodzi, o zdrowym słuchu. W wyniku treningu osiągnęli oni pewną biegłość w ocenie porównawczej brzmienia sygnałów fonicznych, co pozwala sądzić, że ich oceny były ostrzejsze, niż mogłoby to być w przypadku słuchaczy nieprzygotowanych. Ponieważ zasadnicze pomiary prowadzono z modelem układu, uzyskano wyniki opisujące sytuację, w której zauważalność jest największa. Jednocześnie sama metoda pomiarowa bezpośrednio porównywanie sygnału wzorcowego i zniekształconego, ułatwiała zauważanie różnicy. Można z tego wnioskować, że zastosowanie do projektowania wartości progowych, odczytanych z wykresów zauważalności, da w rezultacie zestawy o właściwościach nie gor-



szych, niż założone.

Projektowanie w oparciu o układ nierównomierności (4.2) wymaga wstawienia za  $t_{np}$  konkretnych wartości progowych. Wartość  $t_{np}$  odpowiadająca zauważalności 50% stanowi wartość progową zauważalności dla grupy słuchaczy, przy której połowa odpowiedzi wskazuje na wystąpienie różnicy. Przy obecnych wysokich wymaganiach odnośnie do jakości sprzętu elektroakustycznego zauważalność pięćdziesięcioprocentowa jest zbyt duża, zaleca się przyjęcie zauważalności 15% ("całkowicie niezauważalne") lub 30% ("praktycznie niezauważalne") [23].

Wymagań co do wartości progowej nie można nadmiernie zaostrzać, gdyż jest znaną prawidłowością [23], że nawet przy braku zniekształceń występuje pewna frakcja odpowiedzi stwierdzających istnienie różnicy. Zjawisko to związane jest nie tylko z metodą SB. Występuje ono także w metodach przymusowego wyboru ("poprawka na zgadywanie") [26]. Kierując się tym przyjęto jako wartość progową  $t_n$  przy którym 30% słuchaczy stwierdzało istnienie zniekształceń. Odczytanie wartości progowych zauważalności z wykresów, podanych w rozdziale 3.2 dostarczy danych do projektowania zestawów zawierających w zwrotnicy filtry Butterwortha. Powstaje jednak problem, co zrobić w przypadku innych stosowanych typów zwrotnic, zawierających na przykład różnego rodzaju filtry aktywne lub też filtry Butterwortha o niejednakowych częstotliwościach granicznych. Rozwiązanie tego problemu byłoby proste, gdyby były znane równania, opisujące przekształcanie i wartościowanie sygnału w procesie percepcji dźwięku. Wówczas wystarczyłoby zastosować te same równania w analizie sygnału, żeby móc przewidzieć reakcję słuchaczy przy dowolnych bodźcach. Niestety aktualna wiedza o działaniu niższych pięt narządu słuchu [32] upewnia w przekonaniu, że jego opis matematyczny jest zbyt skomplikowany dla zastosowań omawianego typu.

Ponieważ poszukiwanie sposobu opisu sygnału w oparciu o znajomość działania organu słuchu na obecnym etapie nie daje rezultatów, które możnaby wykorzystać, czynione są próby postępowania odwrotnego. Zakłada się pewne miary zniekształceń

a następnie bada ich zgodność z wynikami pomiaru psychoakustycznego. Takimi miarami w przypadku zniekształceń linearnych są np. całka z modułu odchyłeń charakterystyki amplitudowej od wartości średniej [72] lub wartość średnia całki z odchylenia kwadratowego charakterystyki [73]. Mimo, iż autorzy tych prac stwierdzili zgodność proponowanych miar z oceną słuchową w zbadanych przypadkach, brakuje przekonujących danych, które pozwoliłyby sądzić, że przedstawiają one uniwersalny opis zauważalności zniekształceń linearnych.

Należy dodać, że zagadnienie wpływu oceny nierównomierności charakterystyki głośnika na jego ocenę jest bardziej złożone niż problem związku pomiędzy zauważalnością zniekształceń wynikających z różnicy odległości od głośników a charakterystyką zestawu.

W przypadku pierwszym konieczne jest uwzględnienie większej liczby parametrów - częstotliwości dolnej i górnej głośnika oraz nierównomierności jego charakterystyki, mogącej przybierać najrozmaitsze formy. Przy badaniu zniekształceń charakterystycznych dla zestawów głośnikowych zakres zmienności jest mniejszy, łatwiej kontrolować poszczególne parametry charakterystyki. Jak widać z rys. 2.3 wystąpienie zniekształceń przejawia się na charakterystykach w formie występowania bardziej lub mniej rozległych minimów i maksymów. Przy wartości  $t_n$  odpowiadających progowi zauważalności występuje zwykle tylko jedno ekstremum, jeśli pojawiają się dwa, to drugie jest dużo mniejsze.

Przedstawiony stan rzeczy sugerował, aby dokonać próby porównania krzywej zauważalności z przebiegami kilku prostych miar zniekształceń takich jak maksymalna wartość modułu różnicy pomiędzy charakterystykami zestawu dla  $t_n$  i  $t_n=0$  wyrażonymi w mierze logarytmicznej (rozstęp charakterystyk).

$$M(t_n) = \max \left| 20 \lg \frac{D(t_n, \omega_n)}{D(0, \omega_n)} \right| \quad (4.6)$$

czy średnia wartość całki z modułu różnicy zawartej we wzorze (4.6) lub też pierwiastek ze średniej wartości całki kwadratu tej różnicy. Metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono

współczynniki przeliczeniowe jednostek wymienionych miar na zauważalność oraz błędy aproksymacji. Otrzymane błędy aproksymacji były zbyt duże, aby można było przyjąć założone miary. Zbyt duża była również zmienność współczynników obliczanych dla różnych typów zwrotnic. Przyjęcie modelu działania słuchacza, opartego o schemat uwzględniający rozdzielenie wyniku obserwacji bodźca przez słuchacza od odpowiedzi, którą daje słuchacz [12] również nie dało zadowalających rezultatów.

Prace nad znalezieniem skali ilorazowej zauważalności zniekształceń słusznej dla całego zakresu zmienności przerwano w momencie, kiedy stopień skomplikowania operacji matematycznych, które trzeba by wykonać na charakterystykach zestawu, aby móc przewidzieć zauważalność dla nowego typu zwrotnicy, przekroczył granice stosowalności w praktyce projektowej. Uzyskiwane wyniki nie negowały możliwości znalezienia sposobu opisu właściwości zestawów dającego rezultaty zgodne z reakcjami słuchaczy, jednakże stosowane instrumentalne podejście nie dawało dużej szansy osiągnięcia wyników poznawczych w teorii słyszenia, a jedynie narzędzie pomiarowe i to w dodatku nadmiernie skomplikowane dla celów praktyki.

Celem skalowania było stworzenie bazy liczbowej do optymalizacji projektowania rozmieszczenia głośników, a zwłaszcza możliwości przewidywania wartości progowej zauważalności. Miara stosowana do predykcji powinna mieć przy tym prostą postać. Ponieważ najprostszą do zastosowania postacią ma miara dana wzorem (4.6) sprawdzono, czy użycie jej daje wyniki możliwe do przyjęcia. W tym celu zastosowano następującą procedurę. Ponieważ wcześniej stwierdzono, że zauważalność zależy od charakterystyki amplitudowej zestawu, przy czym parametrem charakterystyki i zmienną niezależną krzywej zauważalności jest  $t_n$ , uśredniono wszystkie wyniki pomiarów uzyskane dla danego typu charakterystyki i danej wartości  $t_n$ . Następnie z wykresów (rys.3.4) odczytano wartości  $t_n$ , przy których zauważalność była równa przyjętemu progowi 30%. Dalejszym krokiem było obliczenie na EMC wartości  $M(t_{np})$  danej wzorem (4.6) .

Zestawienie wyników podane jest w tabeli 4.1.

Tabela 4.1

Wartości progowe zauważalności i odpowiadający im maksymalny rozstęp charakterystyk dla różnych typów charakterystyk amplitudowych.

| typ zwrotnicy | $t_{np}$ | $M(t_{np})$ , w dB |
|---------------|----------|--------------------|
| D1(+), G1(-)  | 0,33     | 3,1                |
| D1(-), G1(+)  | 0,45     | 2,1                |
| D2(-), G2(-)  | 1,16     | 3,2                |
| D3(+), G3(-)  | 0,83     | 2,5                |
| D3(-), G3(+)  | 0,58     | 3,8                |

Obliczona wartość średnia rozstępu charakterystyk  $M(t_{np})$  wynosi:

$$M(t_{np}) = 2,95 \text{ dB} \quad (4.7)$$

długość 99-procentowego półprzedziału ufności wynosi

$$L = 0,84 \text{ dB} \quad (4.8)$$

Tak więc wartość progowa rozstępu charakterystyk amplitudowych przy której 30% słuchaczy zauważa różnicę w brzmieniu sygnału jest zawarta w przedziale

$$2,1 \text{ dB} \leq M(t_{np}) \leq 3,8 \text{ dB} \quad (4.9)$$

Znając wartość  $M(t_{np})$  można obliczyć dla każdego nowego typu zwrotnicy dopuszczalną wartość  $t_{np}$ . Wyniki obliczeń dla zwrotnic z filtrami Butterwortha o niejednakowych częstotliwościach granicznych podane są w pracy [46], zawierającej również opis techniczny procedury projektowania rozmieszczenia głośników.

## 5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań nad wpływem typu zwrotnicy i rozmieszczenia głośników w zestawie na obszar odsłuchu przy transmisji monofonicznej i stereofonicznej. Rezultaty analizy teoretycznej oraz pomiarów psychoakustycznych posłużyły do sformułowania zasad projektowania optymalnego rozmieszczenia głośników w zestawach głośnikowych oraz pozwoliły określić zalecenia co do sposobu rozmieszczania głośników w układach stereofonicznych. Wyniki pomiarów, przeprowadzonych w układach zawierających najczęściej stosowane w zwrotnicach głośnikowych filtry Butterwortha, stworzyły bazę danych do projektowania, uogólnioną następnie dla wszystkich typów zwrotnic głośnikowych.

Realizacja celu pracy, który zawierał niespotykane dotąd w literaturze sformułowanie kryterium optymalizacji rozmieszczenia głośników ze względu na obszar odsłuchu, a nie tylko ze względu na przebieg charakterystyki zestawu na jego osi, wymagała zbadania szeregu zagadnień, związanych z promieniowaniem dźwięku przez zestawy głośnikowe oraz z percepcją sygnałów fonicznych transmitowanych przez zestawy. Główne wyniki i wnioski z badań przedstawione są poniżej.

1. Wyprowadzono i przeanalizowano równania charakterystyk kierunkowości zestawów dwudrożnych z filtrami Butterwortha.
2. Wyprowadzono równanie charakterystyki mocowej zestawu głośnikowego. Analiza charakterystyki, poparta wynikami pomiarów, pozwoliła stwierdzić, że w przeważającej większości zestawów głośniki promieniują jako źródła niezależne.
3. Określono natężeniowe wskaźniki lokalizacyjne związane z rozmieszczeniem głośników w zestawach wchodzących w skład stereofonicznego układu odsłuchowego i zbadano ich znak. Stwierdzono, że w określonych przypadkach może występować wzajemna kompensacja wskaźników natężeniowych i czasowych, powodująca zmniejszenie zniekształceń lokalizacji obrazu

pozornego przy przemieszczeniu się słuchacza poza oś układu odsłuchowego.

4. Opracowano układy do psychoakustycznych pomiarów właściwości urządzeń głośnikowych. Zracjonalizowano pomiary przez zastosowanie modelu zestawu.
5. Zbadano zauważalność zniekształceń linearnych, charakterystycznych dla zestawów głośnikowych. Stwierdzono, że różnica odległości od poszczególnych głośników powoduje zniekształcenia linearne sygnału, spostrzegane przez słuchacza wskutek zmiany widma amplitudowego przy pomijalnym co najwyżej wpływie zmian widma fazowego. Wniosek ten jest zbieżny z opublikowanymi w roku 1978 przez Blauerta i Lawsa [13] wynikami badań zauważalności nieminimalnofazowych opóźnień grupowych w przetwornikach elektroakustycznych. Stwierdzono, że zauważalność zniekształceń zależy od opóźnienia znormalizowanego  $t_n$  danego wzorem (2.38), co pozwala przewidywać zauważalność dla dowolnej częstotliwości rozdziału z przebadanego zakresu. Wyniki porównania zauważalności zniekształceń i nachyleń charakterystyk amplitudowych w funkcji  $t_n$  pozwalają sądzić, że możliwe jest konstruowanie skal porządkowych zauważalności w oparciu o daną wzorami (2.39) i (2.40) postać funkcyjną charakterystyk.
6. Weryfikacja wniosków z badań modelowych, przedstawionych w p.5 przeprowadzona w oparciu o porównania ich z wynikami pomiarów z zestawami rzeczywistymi, potwierdziła je. Stwierdzono ponadto istotny wpływ charakterystyki mocowej zestawu na wartość liczbową zauważalności. Dane liczbowe uzyskane dla modelu są wartościami skrajnymi, zapewniającymi niezauważalność zniekształceń w przypadku użycia ich do projektowania zestawów głośnikowych.
7. Porównanie wyników pomiarów zauważalności zniekształceń przestrzennych obrazu dźwiękowego, występujących przy



transmisji stereofonicznej, z zauważalnością zmiany brzmienia, występującej przy transmisji monofonicznej, wskazało przewagę zauważalności zmian brzmienia. Spełnienie zasady kompatybilności systemów transmisyjnych wymaga zatem korzystanie z danych uzyskanych dla odsłuchu monofonicznego.

8. Potwierdzono występowanie wpływu rozmieszczenia głośników wchodzących w skład stereofonicznego układu dźwiękonadawczego na wrażliwość układu na przemieszczenie słuchacza od osi układu. Stwierdzono, że kompensacja wskaźników w badanym układzie była lepsza, niż w układach specjalnych, znanych z literatury. Zgodnie z punktem 7, możliwość kompensacji wskaźników lokalizacyjnych należy traktować jako wtórną w stosunku do dążenia do zapewnienia niewystępowania zmian brzmienia dźwięku.
9. Sformułowano kryterium optymalizacji rozmieszczenia głośników w zestawie w zależności od rodzaju zwrotnicy i określono związek obszaru odsłuchu z geometrią zestawu. Stworzono bazę danych do projektowania poprzez uogólnienie wyników pomiarów psychoakustycznych przy zastosowaniu rozstępu charakterystyk jako miary zniekształceń linearnych.

W prowadzonych badaniach, a zwłaszcza w analizie promieniowania dźwięku przez zestawy głośnikowe, konieczne było przyjęcie wielu założeń, umożliwiających wyprowadzenie zależności w postaci pozwalającej sformułować, zweryfikowane w pomiarach psychoakustycznych, wnioski ogólne. Mimo, iż dyskusja założeń wskazuje na szeroką stosowalność przedstawionych badań<sup>x/</sup> można sobie wyobrazić sytuacje, w których na przykład charakterystyki zestawów nie będą miały określonych w pracy właściwości. W badaniu tych szczególnych przypadków możliwe jest jednak zastosowanie zasadniczej idei rozprawy, jaką jest maksymalizacja obszaru odsłuchu zestawu w oparciu o wyniki pomiarów zauważalności zniekształceń linearnych sygnału fonicznego wywołanych różnicą odległości od poszczególnych głośników w zestawie do słuchacza.

<sup>x/</sup> Wyniki badań zostały wdrożone w ZWG Tonsil do praktyki projektowej.

Na zakończenie autor chciałby wyrazić podziękowanie za opiekę nad badaniami promotorowi pracy, doc. dr. inż. Januszowi Renowskiemu oraz osobom, które pomogły w technicznej realizacji pracy - prowadzącym pomiary paniom inż. Krystynie Łowińskiej i Ewie Wiatrowskiej, a szczególnie mgr. inż. Jerzemu Swierkowskiemu za jego pomoc w wykonaniu układów pomiarowych.

LITERATURA

- [1] Allison R.F., Berkovitz R. : The Sound Field in Home Listening Rooms, J. Audio Eng. Soc. t. 20, 1972, nr 6, s. 459-469.
- [2] Ashley J.R., Henne L.M.: Operational Amplifier Implementation of Ideal Electronic Crossover Networks, J.Audio Eng. Soc. t.19, 1971, nr 1, s. 7-11.
- [3] Ashley J.R., Kaminsky A.L., Active and Passive Filters as Loudspeaker Crossover Networks, J. Audio Eng. Soc., t.19, 1971, nr 6, s. 494-501.
- [4] Askinazi G.B., Stanislavskaja I.B. - Issledovanie zametnosti castotnykh iskaženij (W: Issledovanie zamestnosti iskaženij v radioveščatelnykh kanalach ), Moskva, Svjazizdat 1959, s. 29-44.
- [5] Augspurger G.L., Electrical versus Acoustical Parameters in the Design of Loudspeaker Crossover Networks, J. Audio Eng. Soc. t. 19, 1971, nr 6, s. 509-511.
- [6] Baekgaard E., A Novel Approach to Linear phase Loudspeakers Using Passive Crossover Networks, J. Audio Eng. Soc., t.25, 1977, nr 5, s. 284-293.
- [7] Bank G., Hathaway G.T., Time Delay Distortion - Another Viewpoint, 56th Convention Audio Eng. Soc., Paris, 1977.
- [8] Bauer B.B.: Broadening the Area of Stereophonic Perception, J.Audio Eng. Soc., t.8, 1960, nr 2, s. 91-94.
- [9] Bauer B.B., Audibility of Phase Distortion, Wireless World, March 1974, s. 27-28.
- [10] Benson J. E., An Introduction to the Design of Filtered Loudspeaker Systems. J. Audio Eng. Soc. t.23, 1975, nr 7, s. 536-545.
- [11] Blauert J.: Raumlisches Hören, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1974.

- [12] Blauert J., Die Beschreibung von Hörversuchen anhand eines einfachen, systemtheoretischen Modells, Kybernetik t.5, 1969, s. 45-49.
- [13] Blauert J., Laws P., Group Delay Distortions in Electro-acoustical Systems, J. Acoust. Soc. Am., t. 63, 1978, nr 5, s. 1478-1483.
- [14] Cable C.R., Loudspeaker Q-What does it Mean?, J. Audio Eng. Soc., t.22, 1974, nr 5, s.360.
- [15] Charkevič A.A., Spektry i analiz, Gosizdat Moskva 1952.
- [16] Coombs C.H., Dawes R.M., Tversky A., Wprowadzenie do psychologii matematycznej, PWN Warszawa 1977.
- [17] Craig J.H., Jeffress L.A., Effect of Phase on the Quality of a Two-Component Tone, J. Acoust. Soc. Am., t.34, 1962, nr 11, s. 1752-1760.
- [18] Cremer L., Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Bd.1, s. Hirzec Verlag, Stuttgart 1948.
- [19] Dobrucki A., Teoria drgań i promieniowania dźwięku przez stożkową membranę głośnika, Prace Naukowe Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, seria: Monografie, Wrocław 1978.
- [20] Fleicher H., Untersuchungen zur Hörbarkeit von Phasenänderungen Dissertation, Techn. Universität München, München 1976.
- [21] Frankort F.J.M., Vibration and Sound Radiation of Loudspeaker Cones, Philips Res, Repts, Suppl., 1975 nr 2.
- [22] Furdujev W.W.; Stereofonia i mnogokanalnyje zwukowyje sistemy, Energija, Moskwa 1973.
- [23] Goron I.E., Principy klassifikacii kačestvennych pokazatelej /W: Issledovanie zamestnosti iskaženij v radioveščatelnych kanalach/ Svjazizdat, Moskva 1959, s. 16-19.

- [24] Goron I.E., Postnikova O.A., Issledovanie zametnosti iskaženij v radioveščatelnyh kanalach /W:Issledovanie zamestnosti iskaženij v radioveščatelnyh kanalach/, Sviazizdat, Moskva 1959, s. 5-18.
- [25] Góralski A.: Metody opisu i wnioskowania statystycznego w psychologii, PWN, Warszawa 1974.
- [26] Green D.M., Swets J.A., Signal Detection Theory and Psychophysics, Wiley, New York 1966.
- [27] Hansen V. Madsen E.R., On Aural Phase Detection: Part 1, J.Audio Eng. Soc., t.22, 1974, s.10-14.
- [28] Harwood H.D., Audibility of Phase Effects in Loudspeakers, Wireless World, 1976, s. 30-32.
- [29] Harwood H.D., Testing High-Quality Loudspeakers, Audio, t. 55, 1971, nr 9, s.18.
- [30] Hilliard J.K., Notes on How Phase and Delay Distortions Affect the Quality of Speech, Music and Sound Effects, IEEE Trans on Audio, 1964, March-April, s.23-25.
- [31] Hilliard J.K., Kimball H.R., Dividing Networks for Loud Speaker Systems, J. Audio Eng. Soc., t.26, 1978, nr 11, s.850-855.
- [32] Hlibowicki S., Model organu słuchu odzwierciedlający wybrane zjawiska w procesie percepcji dźwięku, Rozpr. Dokt., Instytut Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1976.
- [33] Hlibowicki S., Renowski J., Rudno-Rudziński K., Rozszerzony układ zastępczy głośnika, Prace XXIV Otwart. Semin. z Akust. Gdańsk-Władysławowo, wrzesień 1977, s.335-338.
- [34] Jacobsen O., Some Aspects of the Self and Mutual Radiation Impedance Concept with Respect to Loudspeakers J.Audio Eng. Soc., t.24, 1976, nr 2, s.82-92.
- [35] Jones E.N., How Much Distortion Can You Hear? Trans. of IRE 1954 nr 2.

- [36] Julie J., Minimizing Interference Effects in Tweeters and Tweeter - Woofer Combinations, IEEE Trans on Audio, t. AU-12, 1964, nr 1, s.30-36.
- [37] Lazenby M., How Little Distortion Can We Hear, Wireless World, t. 63, 1957, s. 435-440.
- [38] Linkwitz S.H., Active Crossover Networks for Noncoincident Drivers, J. Audio Eng. Soc., t.24, 1976, nr 1, s.2-8.
- [39] Mathes R.C., Miller R.L., Phase Effects in Monaural Perception, J. Acoust. Soc. Am., t.19, 1947, s.780-797.
- [40] Olson H.F., Loud Speaker and Method of Propagating Sound, U.S. Patent No 1988250 1935.
- [41] Olson H.F.: Direct Radiator Loudspeaker Enclosures. J. Audio Eng. Soc. t. 57, 1969, nr 1, s. 22-29.
- [42] Overley J.P., Energy Distribution in Music, IRE Trans Audio, 1956, nr 5, s.120-123.
- [43] Podrez A., Renowski J., Rudno-Rudziński K., Urządzenia głośnikowe, Prace Naukowe Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Seria: Monografie, Wrocław, 1977.
- [44] Pritchard R.L.: Mutual Acoustic Impedance between Radiators in an Infinite Rigid Plane, J. Acoust. Soc. Am. t.32, 1960, nr 6, s. 730-737.
- [45] Renowski J., Akustyka psychofizjologiczna, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1974.
- [46] Renowski J., Rudno-Rudziński K., Projektowanie rozmieszczenia głośników w obudowie głośnikowej, Inst.Telekom. i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Raport nr I-28/SPR-030/79, Wrocław, 1979.
- [47] Renowski J., Rudno-Rudziński K., Swierkowski J., Badanie związków pomiędzy percepcją przestrzennych cech sygnału dźwiękowego a parametrami układu głośników, Inst. Telekom. i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Raport nr I-28/R-183/78, Wrocław 1978.



- [48] Renowski J., Rudno-Rudziński K., Tomczyk R., Dobór słuchaczy do badań lokalizacji dźwięku, Prace Naukowe Inst. Telekom. i Akustyki Politechniki Wrocławskiej nr 29, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1977.
- [49] Rice Ch.W. Kellogg E.W., Notes on the Development of a New Type of Hornless Loud Speaker, Trans. Am. Inst. Elec. Engr, 1925, t.44, s. 461-475.
- [50] Rudno-Rudziński K.: Urządzenia wielogłośnikowe, Archiwum Akustyki, t.12, 1977, nr 2, s.113-121.
- [51] Rudno-Rudziński K., Podrez A., Renowski J.: Metoda graficzna obliczania charakterystyk częstotliwościowych odgród i obudów otwartych głośników, Prace Nauk. Inst. Telekom. i Akustyki Politechniki Wrocławskiej nr 29, Wyd. Polit. Wr. Wrocław 1977.
- [52] Sachs L.: Statistische Auswertungsmethoden, Springer Verlag, Berlin 1972.
- [53] Sathyanarayana T. V.: Resonance and Efficiency of Column Speakers, Acustica t. 28, 1973, s. 154-158.
- [54] Schroeder M.R. New Results Concerning Monaural Phase Sensitivity, J. Acoust. Soc. Am., t.50, 1959, s.1579.
- [55] Shanefield D., Further Experiments on Phase Audibility, Wireless World 1977 Oct. s. 79-81.
- [56] Skućik E., Osnovy akustiki, Mir, Moskva 1976.
- [57] Skudrzyk E., Die Grundlagen der Akustik, Springer-Verlag, Wien 1954.
- [58] Small R.H., Direct-Radiator Loudspeaker Systems Analysis, IEEE Trans. Audio AU-19, 1971, nr 3, s.269-281.
- [59] Small R.H., Closed-Box Loudspeaker Systems, Part I. Analysis, J. Audio Eng, Soc. t.20, 1972, nr 10, s.798-808.
- [60] Small R.H., Closed-Box Loudspeaker Systems, Part II: Synthesis, J. Audio Eng. Soc. t. 21, 1973, nr 1, s.11-17.

- [61] Small R.H. Vented-Box Loudspeaker Systems Part I: Small-Signal Analysis. J. Audio Eng.Soc. t. 21, 1973, nr 5, s.363-372.
- [62] Small R.H., Vented-Box Loudspeaker Systems. Part II: Large-Signal Analysis, J. Audio Eng. Soc. t.21, 1973, nr 6, s.438-444.
- [63] Small R.H., Vented-Box Loudspeaker Systems, Part III: Synthesis, J. Audio Eng. Soc. t.21, 1973, nr 7, s. 549-555.
- [64] Small R.H., Vented-Box Loudspeaker Systems, Part IV: Appendices, J. Audio Eng. Soc. t.21, 1973, nr 8, s.635-640.
- [65] Small R.H., Passive-Radiator Loudspeaker Systems, Part I. Analysis, J. Audio Eng. Soc. t.22, 1974, nr 8, s.592-601.
- [66] Small R.H., Passive-Radiator Loudspeaker Systems. Part II. Synthesis. J. Audio Eng. Soc. t.22, 1974, nr 9, s.683-689.
- [67] Small R.H., Constant-Voltage Crossover Network Design, J. Audio Eng. Soc., t.19, 1971, nr 1, s.12-19.
- [68] Smith A.O., Electronic Crossover Networks and their contribution to Improved Loudspeaker Transient Response, J. Audio Eng. Soc., t.19, 1971, nr 8, s.674-679.
- [69] Sołtys Z., Opracowanie nagrań probierczych do słuchowej oceny głośników, Praca dyplomowa Instytut Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1974.
- [70] Sołtys Z., Wąsowicz Z., Metody oceny słuchowej głośników, Prace Nauk. Inst. Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Seria: Monografie, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1978.
- [71] Staffeld H., Correlation between Subjective and Objective Data for Quality Loudspeakers, J. Audio Eng. Soc., t.22, 1974, nr 6, s. 402-415.
- [72] Sułkońska W., Wąsowicz Z. Żyszkowski Z., Badanie związków między właściwościami akustycznymi głośników a ich subiektywną oceną słuchową, Prace Nauk. Instytutu Telekom.

i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, nr 29, Wyd.Polit. Wrocławskiej, Wrocław, 1977.

- [73] Szmał C., Wskaźnik oceny jakości głośnika skorelowany z wynikami badań słuchowych, Rozprawa doktorska, Instytut Telekom. i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1976.
- [74] Szumska B., Pomiary właściwości komory bezpogłosowej, Praca dyplomowa, Wydz. Łączności Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1962.
- [75] Thiele A.N., Optimum Passive Loudspeaker Dividing Network, Proc. IREE, 1975, July, s. 220-224.
- [76] Thuras A.L. Sound Translating Device, 1930, US Patent No 1.869, 178.
- [77] Whitworth R.M., Jeffress L.A., Time versus Intensity in the Localization of Tones, Acoust. Soc. Am., t.18, 1961, s. 925-929.
- [78] Woodworth R.S., Schlosberg H., Psychologia eksperymentalna, PWN, Warszawa, 1963.
- [79] Wyrzykowski R., Liniowa teoria pola akustycznego ośrodków gazowych, Rzeszów 1972.
- [80] Żyszkowski Z.: Podstawy elektroakustyki, WNT Warszawa, 1966
- [81] Żyszkowski Z., Kulesza B., Wąsowicz Z., Pomieszczenie odsłuchowe do subiektywnych badań jakości transmisji dźwięku, Zesz.Nauk. Polit. Wrocł. Wrocław, 1967, nr 147, łączność z.13, s.103-123.
- [82] Akustičeskij kontrol pri stereozapisach i peredačach, Zalecenie Komisji Techn. OIRT nr 44 /Dok.TK-XVIII-26/
- [83] Informative Guide for Subjective Listening Tests, Draft, IEC Report Publication 543, 1976.
- [84] Loudspeaker-boxen: Technische Daten, Unitra Tonsil 1978.

O D B I O R C Y

egz.

|  |   |
|--|---|
| 1. Ośrodek Informacji Naukowo-Technicznej ITA  | 1 |
| 2. Biblioteka Główna Politechniki Wrocławskiej | 1 |
| 3. Biblioteka Główna Politechniki Gdańskiej    | 1 |
| 4. Biblioteka Główna Politechniki Warszawskiej | 1 |
| 5. Promotor                                    | 1 |
| 6. Recenzenci                                  | 2 |
| 7. Pracownia Percepcji Dźwięku                 | 2 |
| 8. Autor                                       | 3 |

-----  
12