

(Prace doktorskie)

Ryszard Janczur

TEORETYCZNE I MODELOWE
BADANIE POŁA AKUSTYCZNEGO
WYWOŁANEGO ŹRÓDŁEM PUNKTOWYM
W OBECNOŚCI
POWIERZCHNI ODBIJAJĄCYCH I EKRANU

8/1990

P. 269



WARSZAWA 1990

<http://rcin.org.pl>

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 27 listopada 1989 r.

Praca doktorska

recenzenci - Prof. dr hab. inż. Jerzy Sadowski
Doc. dr hab. Rufin Makarewicz
Doc. dr hab. Witold Rybarczyk



56820



Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 140 egz. Ark.wyd. 6,75 Ark.druk. 8,4

Oddano do drukarni w lutym 1990 r.

Nr zamówienia 142/90

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa
ul. Śniadeckich 8

PRACA DOKTORSKA

Ryszard Jancsur

Zakład Aereakustyki IPPT PAN

"TEORETYCZNE I MODELOWE BADANIE POLA AKUSTYCZNEGO
WYWOŁANEGO ŹRÓDŁEM PUNKTOWYM W OBECNOŚCI POWIERZ-
CHNI ODBIJAJĄCYCH I EKRANU"

STRESZCZENIE

W pracy podjęto zagadnienie opracowania metody obliczania rozkładu pola akustycznego za ekranem płaskim przy obecności dwóch dodatkowych płaszczyzn odbijających. Zagadnienie to jest typowym przykładem z zakresu akustyki urbanistycznej - ekran akustyczny chroniący budynek mieszkalny przed hałasem komunikacyjnym.

Przy praktycznych obliczeniach rozkładu pola akustycznego /efektywności ekranowania/ za ekranem utarło się posługiwanie przybliżonym wzorem Maekawa nie uwzględniającym zjawisk fazywych i zakładającym ekran doskonale izolacyjny.

Przy opracowywaniu metody obliczania rozkładu pola akustycznego za ekranem, w pracy przyjęto sposób ciągłego weryfikowania metody w oparciu o wyniki badań modelowych /rozdz.5/.

Pe omówieniu trzech teorii dyfrakcji: Kirchheffa, Rubinowicza i Semmerfelda /rozdz.3/, do opisu pola akustycznego za ekranem wybrane teorię Rubinowicza.

W rozdz.4 pokazano sposób zastosowania teorii Rubinowicza do obliczania rozkładu pola akustycznego /efektywności ekranowania/ za ekranem płaskim przy obecności dwóch dodatkowych płaszczyzn odbijających: poziomej /pedłża/ i pionowej /fasady

chronionego budynku/.

Opracowywanie metody obliczania rozkładu pola akustycznego za ekranem płaskim /rozd.6/ rozpoczęto od przyjęcia ekranu doskonale izolacyjnego i współczynników odbicia wszystkich płaszczyzn /ekranu, podłoża i fasady chronionego budynku/ równych jedności. Po przeprowadzeniu obliczeń i porównaniu z wynikami badań modelowych wprowadzono zmierzone współczynniki odbicia płaszczyzn użytych w badaniach modelowych, a następnie skończoną izolacyjność ekranu.

Wyniki obliczeń rozkładu pola akustycznego /efektywności ekranowania/ za ekranem po wprowadzeniu współczynników odbicia i skończonej izolacyjności ekranu wykazują dobrą zgodność ilościową i jakościową z wynikami badań modelowych.

We wnioskach /rozd.7/ omówiono możliwości zastosowania przedstawionej metody obliczania rozkładu pola akustycznego dla innych rodzajów źródeł /w pracy przyjęto źródło punktowe fali kulistej/ i możliwości wprowadzenia tłumienia ośrodka /w pracy przyjęto ośrodek bezstratny/.

Wykazano, że nie jest celowe stosowanie ekranu wyłożonego materiałem dźwiękochłonnym z uwagi na niewielką różnicę między efektywnościami ekranowania dla ekranu obustronnie odbijającego i jedностronnie pochłaniającego - od strony fasady.

Ważnym wnioskiem jest fakt, że na działanie ekranu /efektywność ekranowania/ istotny wpływ ma jego izolacyjność /czyli energia fal akustycznych przenikających przez ekran/, a nie fale ugięte na krawędzi ekranu.

Praca została wykonana w ramach Problemu CBBP 02.21 tematu 3.27

1. WSTĘP

Każde umieszczenie przeszkody w polu akustycznym powoduje jego zakłócenie. Fala akustyczna docierając do przeszkody ulega zjawiskom odbicia i dyfrakcji. W przypadku samych odbić rozkład pola akustycznego można obliczyć stosunkowo proste sumując wszystkie fale odbite docierające do rozważanego punktu przestrzeni. Sytuacja komplikuje się jeżeli występują jednocześnie dwa zjawiska odbicia i dyfrakcji. Ma to miejsce w przypadku stosowania ekranów akustycznych jako zabezpieczeń przeciwdźwiękowych, np. w akustyce urbanistycznej. Obok ekranu akustycznego istnieją zawsze dodatkowe powierzchnie od których następują odbicia fali akustycznej.

W obszarach zurbanizowanych głównymi źródłami hałasów są trasy komunikacyjne. W odpowiednio dużych odległościach pojazd będący źródłem hałasu przedstawia sobą źródło punktowe, a trasa komunikacyjna, ciąg źródeł punktowych rozłożonych wzdłuż osi pasa ruchu. Fala akustyczna emitowana przez źródło jakim jest pojazd ulega odbiciu od podłoża po którym on się porusza. W przypadku ochrony przed hałasem budynków, fasada ich przedstawia sobą powierzchnię od której następują odbicia fali akustycznej. Ponadto ekran akustyczny ustawiony pomiędzy źródłem hałasu i obszarem chronionym jest powierzchnią w mniejszym lub większym stopniu /zależnie od jego konstrukcji/ odbijającą. Część hałasu emitowanego przez źródło po przeniknięciu przez ekran /o skończonej izolacyjności/ i odbiciu od jego powierzchni oraz powierzchni fasady i podłoża dotrze do obszaru chronionego /za ekranem/.

Praca ma na celu wykazanie, że dopiero łączne uwzględnienie zjawisk ugięcia, odbicia i przenikania przez ekran pozwoli na określenie rozkładu pola akustycznego w obszarze chronionym.

Z uwagi na to, że ciśnienie wypadkowe w punkcie do którego docierają fale akustyczne jest równe sumie ciśnień, zastosowano ten sposób obliczania ciśnienia /potencjału/ całkowitego. Uwzględnione więc zostały zjawiska fazowe pomijane dotąd przy obliczaniu kwadratu amplitudy ciśnienia wypadkowego jako suma kwadratów amplitud ciśnień fal docierających do punktu obserwacji.

Z uwagi na cele praktyczne obliczenie rozkładu ciśnienia w obszarze chronionym potraktowane jako etap przejściowy prowadzący do obliczenia efektywności ekranowania przy obecności dwóch dodatkowych powierzchni odbijających podłoża i fasady chronionego budynku dla przypadku zastosowania ekranu płaskiego i źródła punktowego.

Wykonane zostały badania modelowe rozkładu efektywności ekranowania ekranu płaskiego w funkcji wysokości punktu obserwacji nad podłożem przy obecności dwóch dodatkowych płaszczyzn odbijających /podłoża i fasady chronionego budynku/. Wyniki badań posłużyły do weryfikacji opracowywanej metody obliczania efektywności ekranowania.

W pracy przedstawione trzy teorie dyfrakcji: Kirchhoffa, Rubinowicza i Sommerfelda. Teorię Kirchhoffa odrzucono z uwagi na założenia wykluczające jej stosowanie w przypadku ekranu będącego półpłaszczyzną. Do opisu pola akustycznego wybrane teorię Rubinowicza będącą asymptotycznym przybliżeniem teorii Sommerfelda /z możliwością przejścia do teorii Sommerfelda będącej ścisłym rozwiązaniem zagadnienia dyfrakcji fali akustycznej na krawędzi półpłaszczyzny w przypadku zbyt dużych rozbieżności między wynikami eksperymentu i obliczeniami/.

Przy opracowywaniu metody obliczania rozkładu pola akustycznego za ekranem płaskim /efektywność ekranowania/, przyjęto drogę kolejnego uwzględniania zjawisk zachodzących w zmierzonej sytuacji. Rozpoczęto od tonu o częstotliwości równej częstotliwości środkowej pasma oktawowego. Potem kolejne wprowadzane do konstruowanej metody obliczeniowej: uśrednianie w paśmie oktawowym, współczynniki odbicia materiałów użytych w badaniach modelowych oraz transmitancję przez ekran. Na każdym etapie wyniki obliczeń efektywności ekranowania porównywane z efektywnością uzyskaną w badaniach modelowych. Ten sposób opracowywania metody pozwalał na kontrolowanie poprawności zmian wprowadzonych do metody obliczeniowej na każdym jej etapie.

2. SPOSOBY OPISU EFEKTYWNOŚCI EKRAŃ

Ekran akustyczny charakteryzują jego własności geometryczne i akustyczne.

Własnościami geometrycznymi ekranu są jego wymiary i kształt. Własności akustyczne ekranu to:

- izolacyjność ekranu, która jest różnicą między poziomami ciśnienia akustycznego fali padającej na ekran i fali przesuniętej przez ekran, traktowany jako nieograniczona płaszczyzna w warunkach pola fali swobodnej,
- efektywność ekranu jest to różnica między poziomami ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji przed i po umieszczeniu ekranu między źródłem, a punktem obserwacji (tylko ekran zakłóca pole fali swobodnej),
- pochłanianie ekranu charakteryzowane jest współczynnikiem pochłaniania α , dla współczynnika α zawierającego się w granicach $0,7 < \alpha < 1$, ekran umownie nazywany pochłaniający dla $0 < \alpha < 0,3$ - odbijający; ekran może być jednocześnie pochłaniający, gdy tylko jedna strona wykazuje własności pochłaniające lub dwustronnie pochłaniający gdy obie strony ekranu wykazują własności pochłaniające.

Ekran nigdy nie jest odosobniony. Istnieje jako jeden z elementów urbanistycznych. W przypadku analizowania ekranu przy istniejącej zabudowie, pola akustycznego nie można rozpatrywać jako swobodnego. Własności ekranujące ekranu przy istnieniu innych elementów zakłócających pola swobodne charakteryzuje się poprzez efektywność ekranowania, czyli różnicę między poziomami ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji w przestrzeni urbanizowanej przed i po zainstalowaniu ekranu. Jest to inna wielkość - z punktu widzenia akustyki urbanistycznej najbardziej istotny parametr określający działanie ekranu.

Ze względu na trudności jakie pojawiają się przy teoretycznym ustaleniu efektywności ekranowania w praktycznych obliczeniach wykorzystywane dotąd w jej miejsce efektywność ekranu.

Na gruncie akustyki geometrycznej, zakładającej prostoliniowe rozchodzenie się dźwięku w postaci promieni dźwiękowych, działanie ekranu prowadziłoby do powstania za ekranem cienia akustycznego, którego granice wyznaczałyby promienie dźwiękowe poprowadzone ze źródła przez krawędzie ekranu. W warunkach

rzeczywistych, gdy ujawnia się fałszywa natura dźwięku, działanie ekranu ma bardziej złożony charakter.

Podstawowym czynnikiem ograniczającym efektywność ekranu będącego idealną półpłaszczyzną, czyli ekranu nieskończenie dużego, doskonale izolacyjnego, w polu swobodnym, jest ugięcie fali akustycznej na górnej krawędzi ekranu.

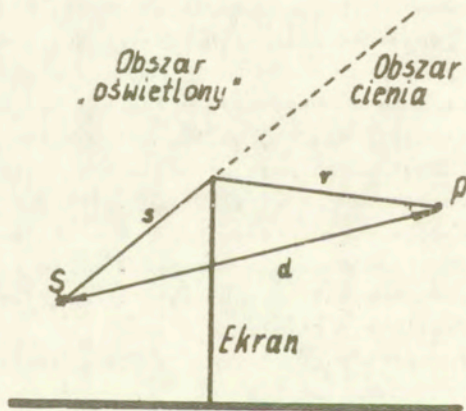
Zgodnie z definicją efektywność ekranu określona jest w następujący sposób:

$$IL = 10 \lg \frac{p^2(P)}{p^2(P)^x}, \quad (2.1)$$

$p^2(P)$ - kwadrat ciśnienia akustycznego fali bezpośredniej w punkcie obserwacji P, gdy nie ma ekranu,

$p^2(P)^x$ - kwadrat ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji P, po umieszczeniu ekranu.

W wyniku zjawiska dyfrakcji do obszaru cienia geometrycznego /rys.2.1/ docierają fale dyfrakcyjne, co oznacza, że efektywność ekranu w obszarze cienia przestaje być nieskończenie duża. Z drugiej strony obniżenie poziomu ciśnienia akustycznego na skutek działania ekranu obserwowane jest w obszarze większym od obszaru cienia akustycznego, czyli jego efektywność nie jest w tym obszarze równa zero.



Rys.2.1. Geometria układu źródło - ekran - punkt obserwacji.

Teorie dyfrakcji rozwinięte na gruncie optyki pozwalają określić pole akustyczne w obszarze za ekranem. [1], [2]

Opierając się na teorii Kirchhoffa zakładającej istnienie źródła punktowego oraz własnych badaniach modelowych i terenowych Maekawa wprowadził następujący wzór określający efektywność idealnego ekranu płaskiego, którym jest ekran nieskończenie długości, doskonale izolacyjny:

$$IL = 10 \lg (20N + 3) \quad N < 1, \quad (2.2)$$

$$IL = 10 \lg 20 \cdot N \quad N \gg 1. \quad (2.3)$$

N - liczba Fresnela

$$N = \frac{2}{\lambda} \delta, \quad (2.4)$$

λ - długość fali,

δ - różnica dróg fali docierającej do punktu obserwacji P bezpośrednio i przez krawędź ekranu:

$$\delta = s + r - d, \quad (2.5)$$

zgodnie z oznaczeniami na rys.2.1:

s - odległość źródła S od krawędzi ekranu,

r - odległość punktu obserwacji od krawędzi ekranu,

d - odległość punktu obserwacji od źródła w warunkach bez ekranu.

Stosowane są również inne postacie wzorów pozwalających obliczyć efektywność ekranu. Kilka z nich zestawiono w tabeli [2.1] Wzór podany przez Rettingera (tab.2.1) wyprowadzony jest przy założeniu, że źródło dźwięku i punkt obserwacji znajdują się na tej samej wysokości.

Wzór podany przez Rathego (tab.2.1) został opracowany na podstawie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez Maekawę.

W oparciu o geometryczną teorię Kellera wyprowadzony został wzór Kurzego (tab.2.1).

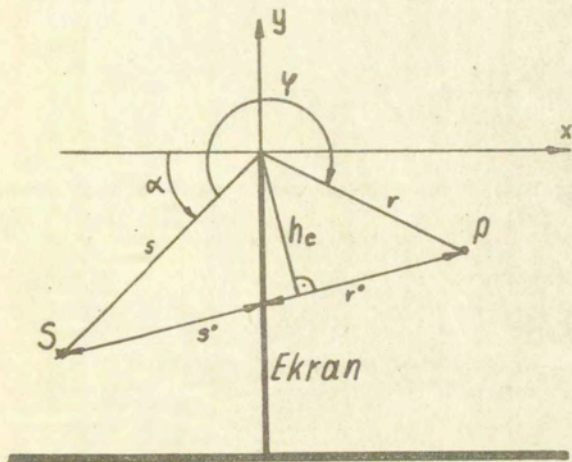
Zależność podana przez Tatge'go jest wzorem opracowanym na podstawie wyników eksperymentalnych (tab.2.1).

Tabela nr [2.1]. [10]

Zestawienie wzorów opisujących efektywność ekranu Π [dB] w polu fali swobodnej / rys.2.2/.

Autor	Wzór i jego oznaczenia
Rettinger [11] 1957 r.	$\Pi = -3 + 10 \log \left[\frac{1}{2} - x/2 + \sqrt{\frac{1}{4} - y/2} \right]^2,$ $x = \int_0^y \cos \frac{\pi}{2} v^2 / dv,$ $y = \int_0^y \sin \frac{\pi}{2} v^2 / dv,$ $v = h_e \sqrt{\frac{z(s^0 + r^0)}{\lambda s r}},$ <p> s^0 - odległość źródła dźwięku od ekranu, r^0 - odległość obserwatora od ekranu, h_e - wysokość efektywna ekranu. </p>
Rathe [12] 1969 r.	$\Pi = 13 \text{ dB} + 10 \log N, \text{ dla } N \geq 1,$ $N = \frac{2(s+r-s^0-r^0)}{\lambda}$ <p> N - liczba Fresnela, λ - długość fali akustycznej, s, r, s^0, r^0 - oznaczenia zgodne z oznaczeniami na/rys 2.2/. </p>
Kurze [13] 1971 r.	$\Pi = -20 \log \frac{d / \sec \frac{\varphi - \alpha}{2} \pm \csc \frac{\varphi + \alpha}{2}}{2 \sin \delta / \frac{2\pi}{\lambda} / \left[\frac{s r}{s + r} \right]^2},$ <p> przy tym: $\delta \neq 0, \varphi \neq -\alpha, \varphi \neq 180^\circ + \alpha, \varphi = 270^\circ + \varphi, \neq 360^\circ$ s, r, φ, α - oznaczenia zgodne z oznaczeniami na rys /2.2/ </p> <p> d - odległość obserwatora od źródła dźwięku δ - kąt pomiędzy falą padającą a krawędzią ekranu. </p>
Tatge [14] 1972 r.	$\Pi = 10 \log /1 + 10N /,$ <p> dla $N > 0$, N - wzór (2.4). </p>

Wszystkie wzory podane w tabeli (2.1) pozwalają obliczyć efektywność ekranu w polu fali swobodnej, a więc bez obecności dodatkowych powierzchni odbijających.



Rys.2.2. Oznaczenia występujące w tabeli 2.1.

3. POLE AKUSTYCZNE W OBSZARZE OGRANICZONYM

3.1. Opis pola akustycznego

Przedmiotem rozważań będą dźwięki rozchodzące się w powietrzu.

W przeprowadzonych rozważaniach powietrzu przypisywane są następujące własności:

- jednorodność,
- doskonała sprężystość,
- doskonała płynność,
- bezstratność.

W ośrodku takim dla fali monochromatycznej spełnione jest równanie Helmholtza:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi + k^2 \phi &= 0, \\ k &= \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

k - liczba falowa.

Dzięki stosowaniu do opisu zjawisk dźwiękowych w powietrzu potencjału akustycznego /dla fali monochromatycznej spełniającego równanie (3.1) /, rozwiązanie problemu propagacji dźwięku w obszarze ograniczonym sprowadza się do rozwiązania równania Helmholtza (3.1), będącego równaniem różniczkowym cząstkowym typu eliptycznego, przy odpowiednio sformułowanych warunkach brzegowych.

3.2. Zjawisko dyfrakcji

Definicję zjawiska dyfrakcji sformułował Semmerfeld.

W odniesieniu do dźwięku będzie ona brzmiała:

- dyfrakcją są wszelkie odchylenia od prostoliniowego rozchodzenia się promieni dźwiękowych, które nie wynikają ze zjawisk odbicia czy załamania lub niejednorodności środka.

Pierwsza interpretacja zjawiska dyfrakcji pojawiła się wraz z odkryciem falewej natury światła. Przedmiotem opisu był obraz rozkładu natężenia światła za otworem w ekranie. Przedstawiony opis dyfrakcji związany jest z intuicyjną interpretacją Huygensa propagacji ruchów falewych:

- każdy punkt do którego dotarła fala jest źródłem wtórnej fali kulistej.

Następnie Fresnel, przyjmując arbitralne założenia o amplitudzie i fazie wtórnych fal kulistych, uwzględniając zjawisko interferencji tych wtórnych fal, mógł obliczyć rozkład natężenia światła w obrazie dyfrakcyjnym powstającym za otworem w ekranie.

Matematyczny opis zjawiska dyfrakcji przedstawiony przez Kirchhoffa potwierdził założenia uczynione przez Fresnela o wtórnych falach kulistych. Opis ten pozwala z dobrym przybliżeniem opisać zjawiska dyfrakcji w obszarach niezbyt bliskich krawędzi otworu, w przypadkach gdy rozmiary otworu są znacznie większe od długości fali padającej, [1], [2], [3], [4], [5].

Rozważając dyfrakcję fal dźwiękowych należy pamiętać o tym, że zakres częstotliwości słyszalnych dla człowieka rozciąga się od 16 do 16000Hz, co odpowiada zakresowi długości fal w powietrzu od około 20 m do 2 cm.

Stosowane dwa sposoby przybliżonego rozwiązania zagadnienia dyfrakcji znane są w literaturze pod nazwą teorii dyfrakcji Kirchhoffa - Fresnela i Rayleigha - Sommerfelda [2], [3], [4].

Ścisłe rozwiązanie problemu ekranu w kształcie półpłaszczyzny w obszarze propagacji fali jest dziełem Sommerfelda i polega na przyjęciu na powierzchni ekranu warunków brzegowych odpowiadających serwowaniu się ciśnienia akustycznego /ekran doskonale miękki/ lub prędkości akustycznej /ekran doskonale twardy/.

3.2.1. Teoria dyfrakcji Kirchhoffa.

Matematyczny opis zjawiska dyfrakcji podał jako pierwszy Kirchhoff w 1882 roku. Punktem wyjścia było matematyczne sformu-

muławanie zasady Huygensa. Przedstawiona przez Kirchhoffa teoria jest elementem falowej, skalarnej teorii światła, która odpowiada w swoim opisie matematycznym akustyce falowej. W obu tych przypadkach spełnione jest dla fali monehromatycznej równanie Helmholtza (3.1).

Stosując do równania Helmholtza (3.1) twierdzenie Greens, potencjał w punkcie P można przedstawić w postaci wzoru Kirchhoffa [15]:

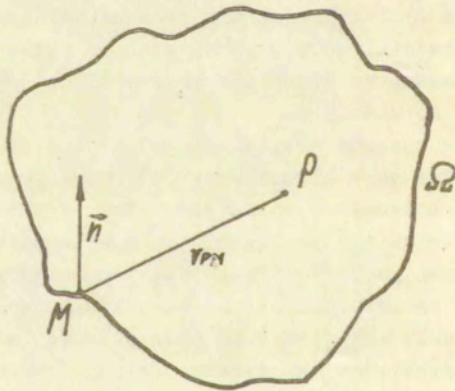
$$\phi(P) = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \left\{ [\phi(M)]_{\Omega} \cdot \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{\exp(ikr_{PM})}{r_{PM}} \right] + \right. \\ \left. - \left[\frac{\partial \phi(M)}{\partial n} \right]_{\Omega} \cdot \frac{\exp(ikr_{PM})}{r_{PM}} \right\} d\Omega, \quad (3.2)$$

Ω - powierzchnia gładka zamknięta otaczająca punkt P,

\vec{n} - normalna wewnętrzna do powierzchni Ω ,

r_{PM} - odległość punktów powierzchni M od punktu P /rys.3.1/,

$[\phi(M)]_{\Omega}$, $\left[\frac{\partial \phi(M)}{\partial n} \right]_{\Omega}$ - wartości potencjału akustycznego i jego pochodnej normalnej na powierzchni Ω .



Rys.3.1. Wielkości i oznaczenia występujące w całości Kirchhoffa.

Na podstawie (3.2) potencjał akustyczny w punkcie P ($\phi(P)$) można określić znając jego wartość i wartość jego pochodnej normalnej na otaczającej punkt P powierzchni Ω .

Wyrażenie (3.2), niosące nazwę całki Kirchhoffa można wykorzystać do określenia potencjału za ekranem będącym nieskończoną półpłaszczyzną [16].

Potencjał ten można wyrazić za pomocą wzoru:

$$\phi(P) = \frac{\exp(-i\frac{\pi}{4})}{\sqrt{\pi}} F(\omega) \phi_0(P), \quad (3.3)$$

gdzie:

$$\phi_0(P) = \frac{\exp(ikd)}{d}, \quad (3.4)$$

$$F(\omega) = \int_{\omega}^{\infty} \exp(iu^2) du, \quad (3.5)$$

$$\omega = \sqrt{k\delta}. \quad (3.6)$$

$F(\omega)$ - całka Fresnela,

δ - (2.5),

d - odległość punktu obserwacji P od źródła S /rys.2.1/

3.2.2. Teoria dyfrakcji Kirchhoffa - Rubinowicza.

W 1917 roku Rubinowicz opublikował pracę [6], [8] w której całkę Kirchhoffa (3.2) rozłożył na dwie części opisujące: falę geometryczną $\phi^g(P)$ i falę dyfrakcyjną $\phi^d(P)$. Otrzymał w ten sposób potencjał w punkcie P:

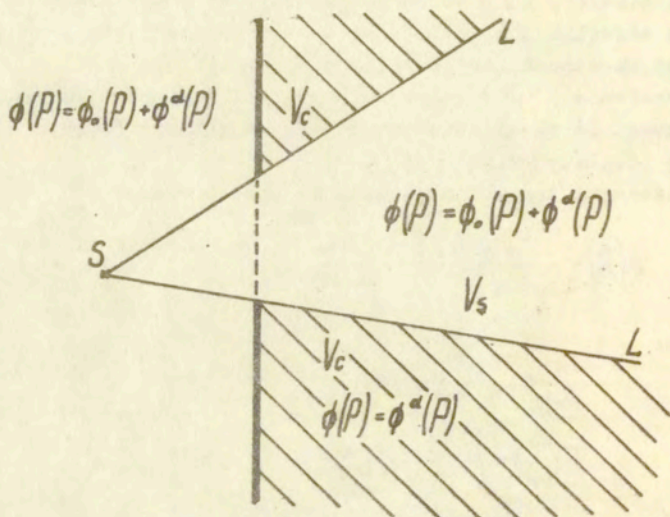
$$\phi(P) = \phi^g(P) + \phi^d(P), \quad (3.7)$$

gdzie:

$$\phi^g(P) = G(P) \cdot \phi_0(P), \quad (3.8)$$

$$G(P) = \begin{cases} 1 & P \notin V_c \\ 0 & P \in V_c \end{cases}, \quad (3.9)$$

V_c - obszar cienia geometrycznego /rys.3.2/



Rys.3.2. Obszary obowiązywania rozwiązania Rubinowicza (3.7).

Postać rozwiązania Rubinowicza (3.7) jest zgodna z prostą intuicją. W obszarze pod ekranem i w steśku "światlnym" V_s /rys.3.2/ występuje fala bezpośrednia pochodząca ze źródła S, która snika w obszarze cienia V_c . Ekran działa w ten sposób, że eliminuje falę bezpośrednią, pochodzącą ze źródła S. Fala dyfrakcyjna powstająca na skutek oddziaływania fali z krawędzią występuje w całej przestrzeni.

Falę dyfrakcyjną występującą we wzorze (3.7) można przedstawić w postaci [16]:

$$\begin{aligned} \phi^d(P) &= -\frac{\exp(-i\frac{\pi}{2})}{\sqrt{\pi}} \operatorname{sgn}(\pi - \theta_0 - \theta) \cdot \\ &\cdot \sqrt{\frac{2d^2}{(S_{sq_0} + r_{pa_0})(S_{sq_0} + r_{pa_0} + d)}} \sin \frac{\theta - \theta_0}{2} \sin \beta. \quad (3.10) \\ &\cdot F(w) \phi_0(P) \end{aligned}$$

gdzie:

$P(w)$ - całka Fresnela od argumentu:

$$W = \sqrt{k(S_{SQ_0} + r_{PQ_0} - d)} \quad (3.11)$$

k - liczba falowa,

S_{SQ_0} - odległość między źródłem S , a punktem Q_0 położonym na krawędzi ekranu wybranym w ten sposób, że suma odległości S_{SQ_0} i r_{PQ_0} jest najmniejsza,

r_{PQ_0} - odległość między punktem obserwacji P , a punktem Q_0 położonym na krawędzi ekranu wybranym w ten sposób, że suma odległości S_{SQ_0} i r_{PQ_0} jest najmniejsza,

θ_0 - kąt między odcinkiem S_0 , a płaszczyzną ekranu,

θ - kąt między odcinkiem r_0 , a płaszczyzną ekranu,

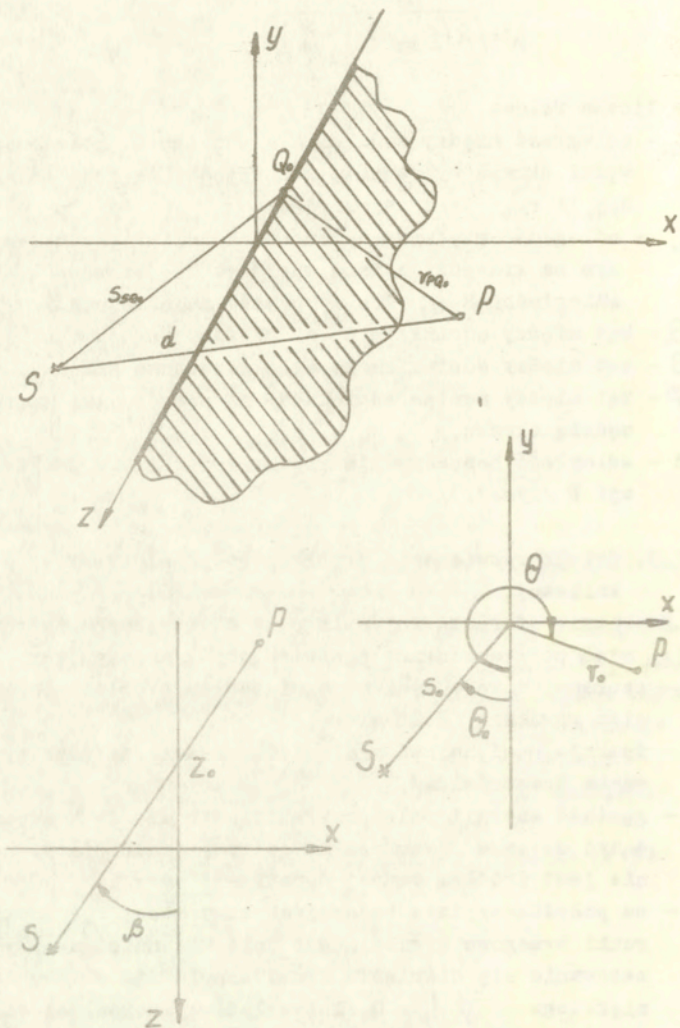
β - kąt między rzutem odcinka SP na płaszczyznę (x, z) , a krawędzią ekranu,

d - odległość bezpośrednia między źródłem S , a punktem obserwacji P /rys.3.3/

3.2.3. Ścisłe rozwiązanie problemu półpłaszczyzny w polu fali kulistej.

Poprawnie sformułowany opis pola akustycznego w którym znajduje się półpłaszczyzna powinien być następujący:

- szukana funkcja będąca rozwiązaniem problemu powinna spełniać równanie Helmholtza,
- funkcja musi znikać w nieskończoności /warunek wypromieniania Sommerfelda/,
- gęstość energii pola przy zbliżaniu się do krawędzi musi dążyć do zera /warunek na ostrzu, oznaczający, że krawędź nie jest źródłem żadnej dodatkowej energii/,
- na półpłaszczyźnie będącej ekranem muszą być spełnione warunki brzegowe wynikające z jego własności akustycznych; zerowanie się ciśnienia akustycznego dla ekranu doskonale miękkiego $\phi|_E = 0$, lub składowej normalnej do powierzchni ekranu prędkości akustycznej dla ekranu doskonale twardego $\frac{\partial \phi}{\partial n}|_E = 0$.



Rys. 3.3. Układ współrzędnych i oznaczenia przyjęte we wzorach określających falę dyfrakcyjną (3.10).

W 1896 roku Sommerfeld po raz pierwszy rozwiązał w sposób ścisły problem półpłaszczyzny w polu fali płaskiej. Wykorzystał w tym celu własności funkcji wielowartościowych [1], [4], [7]

Rozwiązanie problemu półpłaszczyzny w polu fali kulistej podał MacDonald [9] w 1914 roku. W rozwiązaniu MacDonald został przyjęty cylindryczny układ współrzędnych gdzie zgodnie z rys.3.4 d - odległość między źródłem rzeczywistym S_0 a punktem obserwacji P wynosi:

$$d^2 = s_0^2 + r_0^2 - 2s_0 r_0 \cos(\theta - \theta_0) + (z - z_0)^2, \quad (3.12)$$

d' - odległość między źródłem pozornym S'_0 a punktem obserwacji P :

$$d'^2 = s_0^2 + r_0^2 - 2s_0 r_0 \cos(\theta + \theta_0) + (z - z_0)^2, \quad (3.13)$$

R - najkrótsza odległość między źródłem a punktem obserwacji liczona przez krawędź /dla obu źródeł taka sama/ :

$$R^2 = (s_0 + r_0)^2 + (z - z_0)^2 = (s + r)^2. \quad (3.14)$$

W przyjętym układzie współrzędnych pełne ścisłe rozwiązanie problemu półpłaszczyzny doskonale miękkiej ($\phi_S = 0$) w polu fali kulistej można zapisać w postaci:

$$\phi_S(P) = f(k, m) - f(k, m'), \quad (3.15)$$

gdy półpłaszczyzna jest doskonale twarda ($\frac{\partial \phi_H}{\partial n} = 0$):

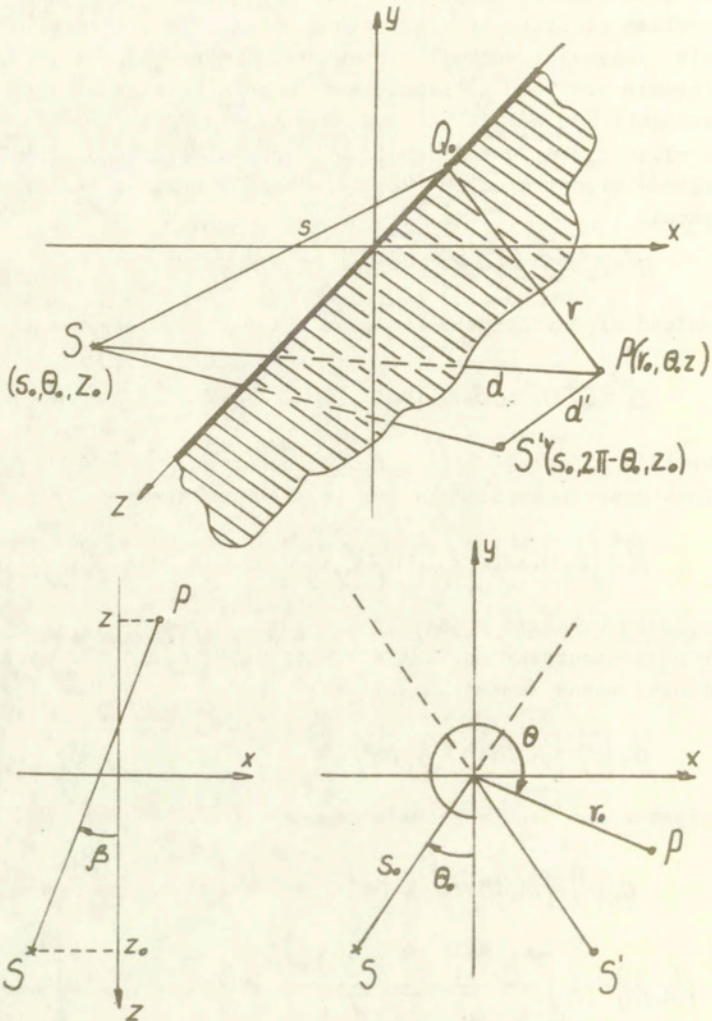
$$\phi_H(P) = f(k, m) + f(k, m'), \quad (3.16)$$

gdzie:

$$f(k, m) = ik \int_m^\infty \frac{H_1^{(1)}(\mu^2 + kd)}{\sqrt{\mu^2 + 2kd}} d\mu, \quad (3.17)$$

$$f(k, m') = ik \int_{m'}^\infty \frac{H_1^{(1)}(\mu^2 + kd')}{\sqrt{\mu^2 + 2kd'}} d\mu, \quad (3.18)$$

$$m = -\operatorname{sgn}(\pi + \theta_0 - \theta) \sqrt{k(R - d)}, \quad (3.19)$$



Rys.3.4. Układ współrzędnych przyjęty dla ścisłego rozwiązania problemu półprzestrzyny w polu fali kulistej Mcdonalda.

$$m' = -\operatorname{sgn}(\pi - \theta_0 - \theta) \sqrt{k(R-d')}, \quad (3.20)$$

$H_1^{(1)}(z)$ - funkcja Hankela pierwszego rodzaju, pierwszego rzędu.

Przy $kR(s, r, z_0, z) \gg 1$ rozwiązania (3.15); (3.16) można zapisać w postaci:

$$\phi_{S(H)}(P) = \phi_{S(H)}^g(P) + \phi_{S(H)}^d(P). \quad (3.21)$$

Pierwszy składnik w wyrażeniu (3.21) jest falą geometryczną /sumą fal geometrycznych pochodzących ze źródła rzeczywistego S i pozornego S' /:

$$\phi_{S(H)}^g(P) = \gamma(\pi + \theta_0 - \theta) \phi_0(P) \pm \gamma(\pi - \theta_0 - \theta) \phi'(P), \quad (3.22)$$

$$\phi_0(P) = \frac{\exp(ikd)}{d}, \quad (3.23)$$

$$\phi'(P) = \frac{\exp(ikd')}{d'}, \quad (3.24)$$

Drugi składnik we wzorze (3.21) opisuje fale dyfrakcyjne:

$$\phi_{S(H)}^d(P) = \phi^d(d, w) + \phi_{S(H)}^d(d', w'), \quad (3.25)$$

$$w = \sqrt{k(R-d)}, \quad (3.26)$$

$$w' = \sqrt{k(R-d')}, \quad (3.27)$$

$$\phi^d(d, w) = -\frac{\exp(-i\frac{\pi}{4})}{\sqrt{\pi}} \operatorname{sgn}(\pi + \theta_0 - \theta) \sqrt{\frac{2d^2}{R(R+d)}} F(w) \phi_0(P), \quad (3.28)$$

$$\phi_{S(H)}^d(d', w') = -\frac{\exp(-i\frac{\pi}{4})}{\sqrt{\pi}} [\pm \operatorname{sgn}(\pi - \theta_0 - \theta)] \sqrt{\frac{2d'^2}{R(R+d')}} F(w') \phi'(P). \quad (3.29)$$

W wyrażeniach (3.22), (3.29) znak "-" obowiązuje dla półpłaszczyzny doskonale miękkiej, "+" obowiązuje dla półpłaszczyzny doskonale twardej.

3.2.4. Wnioski.

Stosowanie wzoru (3.3.) opartego na całce Kirchhoffa do obliczania pola akustycznego w układzie, w którym dochodzi do dyfrakcji na krawędzi półpłaszczyzny, narusza założenia o małych wymiarach otworu [16] /w tym przypadku otworem jest półpłaszczyzna uzupełniająca płaszczyznę, w której leży ekran - będący półpłaszczyzną pełnej płaszczyzny/, które powinny być dużo mniejsze od odległości źródła oraz punktu obserwacji od krawędzi ekranu.

Rozwiązanie Rubinowicza pozwala na określenie zaburzenia pola akustycznego w postaci fali dyfrakcyjnej powstałej na krawędzi półpłaszczyzny. Dzięki rozłożeniu fali akustycznej opisującej pole akustyczne wokół przeszkody na falę geometryczną /rozchodzącą się zgodnie z prawami akustyki geometrycznej/ i dyfrakcyjną /której źródłem jest krawędź/ rozwiązanie Rubinowicza pozwala na analizowanie obu fal osobno.

W przypadku istnienia oprócz ekranu dodatkowych powierzchni odbijających rozwiązanie Rubinowicza pozwala na osobne prześledzenie zjawisk odbicia jakim podlegają fale geometryczne i fale dyfrakcyjne.

Dla obszarów odległych od krawędzi /co ma miejsce w akustyce urbanistycznej/ przybliżona postać ścisłego rozwiązania Semmerfelda, służy dla fal krótkich w porównaniu z odległościami występującymi w układzie, prowadzi do rozwiązania Rubinowicza.

Bierąc to pod uwagę do opisu pola akustycznego w przypadku gdy ekran chroni budynek przed hałasem komunikacyjnym właściwe jest rozwiązanie Rubinowicza.

4. ZASTOSOWANIE TEORII KIRCHHOFFA - RUBINOWICZA DO OPISU POLA AKUSTYCZNEGO W ZŁOŻONYCH UKŁADACH URBANISTYCZNYCH

W złożonych układach urbanistycznych jako zjawiska elementarne można wyróżnić odbicia od powierzchni występujących w układzie i dyfrakcje na krawędziach.

Typowymi elementami na których dochodzi do dyfrakcji są: krawędzie półpłaszczyzn - w przypadku ekranów płaskich - i krawędzie klinów o kącie rozwarcia równym kątowi prostemu - w przypadku naroży budynków.

O krawędziach klinów prostokątnych które tworzą budynki lub ekrany z płaszczyzną podłoża założono, że nie stanowią źródła fal dyfrakcyjnych. Założenie to przyjęto w oparciu o ścisłe rozwiązanie dla wnętrza klina prostokątnego o ścianach doskonale sztywnych lub doskonale miękkich, które zawiera tylko pole geometryczne [7].

Do opisu dyfrakcji na krawędziach zastosowano teorię Kirchhoffa - Rubinowicza, która zakłada, że ekran jest doskonale twardy lub doskonale miękki. Wprowadzając rzeczywiste współczynniki odbicia uwzględniono ich wpływ tylko na fale odbite.

Teoria dyfrakcji Kirchhoffa-Rubinowicza, dzięki rozdzielowi potencjału akustycznego, opisująca pole w przestrzeni wokół ekranu na część geometryczną i dyfrakcyjną, ułatwia obliczenie rozkładu pola akustycznego w przypadku wprowadzenia dodatkowych płaszczyzn odbijających.

Część geometryczna potencjału akustycznego w punkcie obserwacji jest równa sumie potencjałów fal geometrycznych powstałych na skutek odbić od płaszczyzn ograniczających obszar, w którym znajduje się punkt obserwacji. Można uważać, że fale odbite wytwarzane są przez źródła pozorne będące obrazami źródła rzeczywistego, powstałymi na skutek odbicia go w kolejnych płaszczyznach w tym i samego ekranu.

Do części geometrycznej potencjału dodaje się sumę potencjałów akustycznych fal dyfrakcyjnych odbitych od płaszczyzn ograniczających dany obszar, w tym i ekranu.

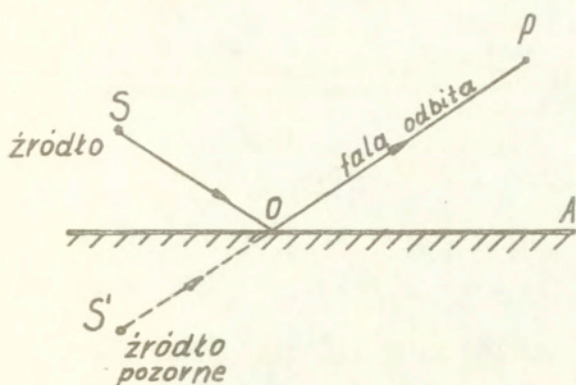
Przedstawiona teoria dyfrakcji Kirchhoffa-Rubinowicza uwzględnia działanie źródła punktowego wszechkierunkowego. W praktycznych zastosowaniach może być koniecznym uwzględnienie działania złożonych źródeł. W takich źródłach można jednak wyróżnić punktowe źródła elementarne o określonej charakterystyce kierunkowości. Na gruncie teorii dyfrakcji Kirchhoffa-Rubinowicza

można opisać dyfrakcję fali pochodzącej ze źródła punktowego, kierunkowego, co zostanie pokazane w tym rozdziale.

4.1. Odbicia od dodatkowych płaszczyzn ograniczających obszar.

W przypadku istnienia dodatkowych płaszczyzn ograniczających obszar, w którym znajduje się źródło fali kulistej i ekran, obliczenia potencjału akustycznego dokonuje się metodą odbić zwierciadlanych. Dotyczy to zarówno fal geometrycznych jak i dyfrakcyjnych.

Metoda odbić zwierciadlanych polega na zastąpieniu źródła S promieniającego falę źródłem S', z którego droga do punktu obserwacji jest równa drodze jaką przebywa fala ze źródła rzeczywistego do punktu, w którym następuje odbicie od płaszczyzny i po odbiciu do punktu obserwacji P /rys.4.1/.



Rys.4.1. Metoda zwierciadlana opisu zjawiska odbicia fali od płaszczyzny.

W punkcie P potencjał akustyczny fali odbitej, czyli fali pochodzącej ze źródła S' o mocy równej mocy źródła rzeczywistego pomnożonej przez ciśnieniowy współczynnik odbicia b_p / rzeczywisty lub zespolony/ można dla źródła punktowego przedstawić w postaci:

$$\phi(S', P) = b_p \frac{\exp ik(r_{SO} + r_{OP})}{r_{SO} + r_{OP}} = b_p \frac{\exp(ikr_{S'P})}{r_{S'P}} \quad (4.1)$$

r_{SO} - odległość między źródłem rzeczywistym S i punktem odbicia O na płaszczyźnie A,

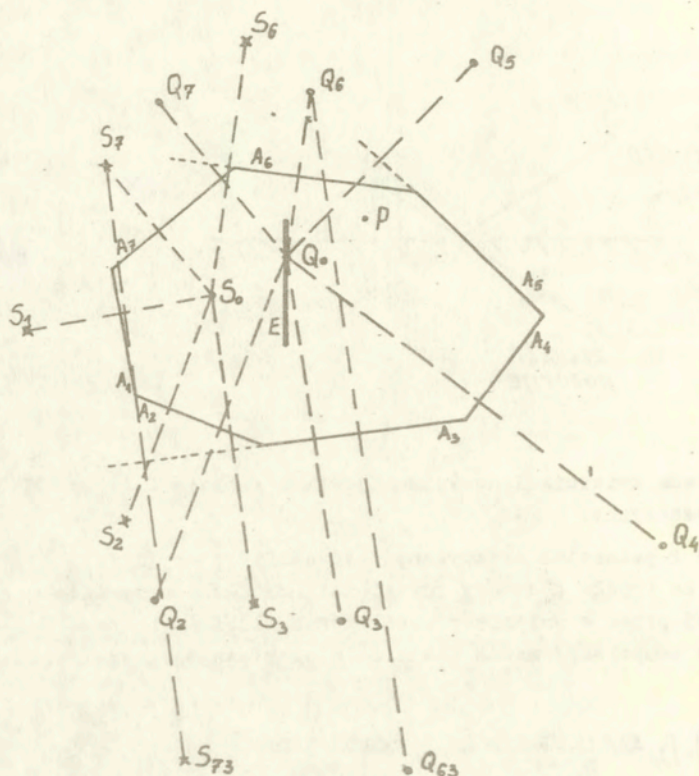
r_{OP} - odległość między punktem obserwacji P i punktem O,

$r_{S'P}$ - odległość między źródłem pozornym S' i punktem obserwacji P

W przypadku gdy źródło i ekran znajdują się w przestrzeni ograniczonej płaszczyznami $A_1, A_2, A_3 \dots$ /rys.4.2/ każde ze źródeł:

- źródło rzeczywiste S,
- źródło S' będące odbiciem źródła rzeczywistego w płaszczyźnie ekranu,
- źródło fali dyfrakcyjnej Q_0 /krawędź ekranu/,

wysyła fale, które będą ulegały odbiciom od płaszczyzn $A_1, A_2, A_3 \dots$, o współczynnikach odbicia $b_1, b_2 \dots$

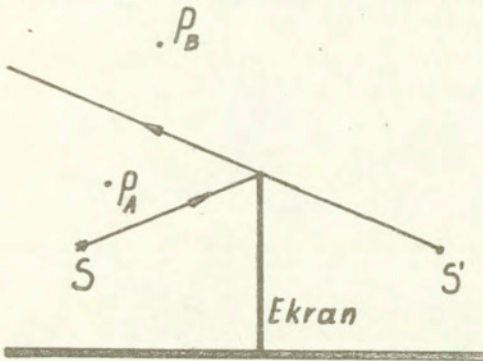


Rys.4.2. Ekran i źródło w przestrzeni ograniczonej dodatkowymi płaszczyznami.

$S_1, S_2, S_3, \dots; Q_1, Q_2, Q_3, \dots$ - źródła pozorne pierwszego rzędu powstałe na skutek odbić zwierciadlanych źródeł S_0 i Q_0 od odpowiednich płaszczyzn A_1, A_2, \dots

$S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}; Q_{11}, Q_{12}, Q_{21}, Q_{22}$ - źródła pozorne drugiego rzędu powstałe na skutek odbić zwierciadlanych źródeł pozornych S_1, S_2, \dots i Q_1, Q_2, \dots od płaszczyzn A_1, A_2, \dots

Potencjał w punkcie obserwacji P oblicza się metodą źródeł pozornych jako sumę potencjałów fal geometrycznych pochodzących od źródeł pozornych $S_1, S_2, S_3, \dots, S'_1, S'_2, S'_3, \dots$, dochodzących do punktu obserwacji P i fal dyfrakcyjnych pochodzących od źródeł pozornych $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q'_1, Q'_2, Q'_3, \dots$, dochodzących do punktu obserwacji P. Aby stwierdzić które z fal pochodzących ze źródeł pozornych dechodzą do punktu obserwacji przeprowadzi się analizę geometryczną danej sytuacji jak np. na rys.4.3. Do punktu P_A dojdzie fala ze źródła S, natomiast do punktu P_B fala ze źródła S' nie dojdzie.



Rys.4.3. Obszar występowania fali odbitej od ekranu.

Potencjał w punkcie obserwacji P przedstawione jako sumę potencjałów wszystkich fal geometrycznych i wszystkich fal dyfrakcyjnych dochodzących do tego punktu:

$$\phi(P) = \phi_{\Sigma}^g(S_{kn}, P) + \phi_{\Sigma}^d(S_{kn}, Q_{ij}, P), \quad (4.2)$$

$$\phi_{\Sigma}^g(S_{kn}, P) = \sum_{k,n} \phi^g(S_{kn}, P), \quad (4.3)$$

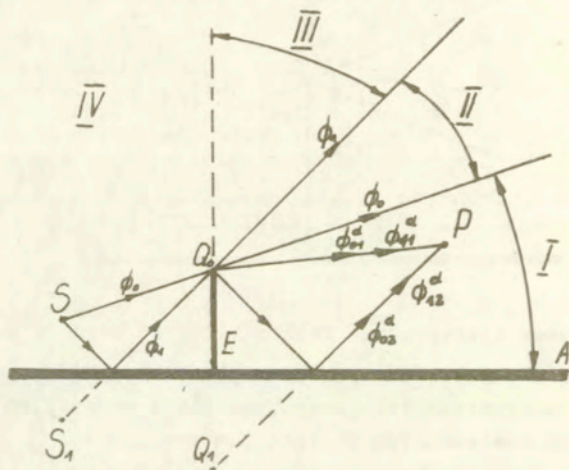
$$\phi_{\Sigma}^d(S_{kn}, Q_{ij}, P) = \sum_{ij, kn} \phi^d(S_{kn}, Q_{ij}, P), \quad (4.4)$$

$\phi^g(S_{k,n}, P)$ - potencjał fali geometrycznej w punkcie obserwacji P będący wynikiem działania źródła pozornego n - tego rzędu po odbiciu od k-tej płaszczyzny,

$\phi^d(S_{k,n}, Q_{ij}, P)$ - potencjał fali dyfrakcyjnej w punkcie obserwacji powstały na skutek oddziaływania fali ze źródłem $S_{k,n}$ z krawędzią po i -tym odbiciu od j -tej płaszczyzny.

Najprostszym przypadkiem dodatkowej płaszczyzny ograniczającej jest sytuacja gdy ekran ustawiony jest na płaskim podłożu co ma miejsce w warunkach rzeczywistych.

Ustawienie ekranu na podłożu /rys.4.4/ spowoduje, że do punktu obserwacji za ekranem dotrą dodatkowe fale powstałe w wyniku odbicia: fali promieniowanej przez źródło S od podłoża przed ekranem i fal dyfrakcyjnych, powstających na krawędzi, odbitych za ekranem.



Rys.4.4. Fale docierające do punktu obserwacji za ekranem ustawionym na podłożu odbijającym.

W dalszych rozważaniach ograniczone się do obszaru za ekranem, dla prostoty i ze względu na mały wpływ w tym obszarze, pominięto fale dyfrakcyjne i związane z nimi fale odbite powstałe w wyniku oddziaływania źródła pozornego będącego zwierciadlanym odbiciem źródła rzeczywistego w płaszczyźnie ekranu.

Obszar za ekranem można podzielić na trzy części /rys.4.4/:
 I - obszar cienia geometrycznego fali bezpośredniej i fali odbitej od podłoża,

II - obszar cienia geometrycznego fali odbitej od podłoża, do którego dociera fala bezpośrednia ze źródła S,

III - obszar do którego docierają fale geometryczne z obu źródeł S i S'.

Ponadto do każdego z tych obszarów docierają cztery fale dyfrakcyjne. Potencjały akustyczne w wyróżnionych obszarach będą sumą potencjałów akustycznych wszystkich fal docierających do punktu P w danym obszarze:

$$\text{I: } \phi = \phi_{o1}^d + \phi_{o2}^d + \phi_{11}^d + \phi_{12}^d ,$$

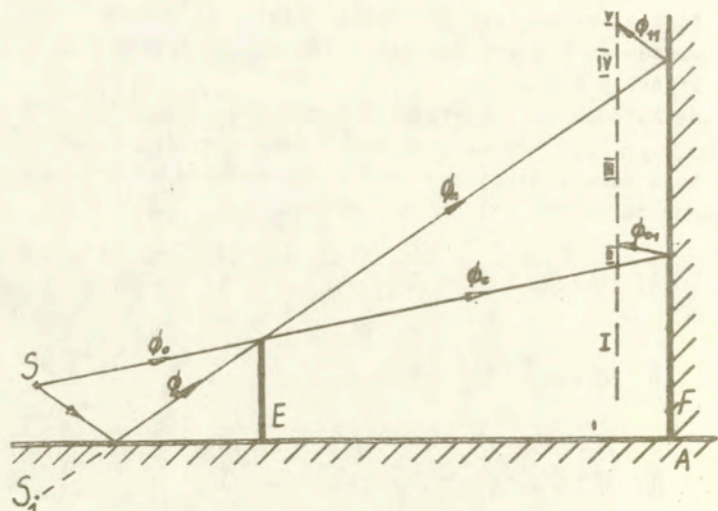
$$\text{II: } \phi = \phi_{o1}^d + \phi_{o2}^d + \phi_{11}^d + \phi_{12}^d + \phi_o , \quad (4.5)$$

$$\text{III: } \phi = \phi_{o1}^d + \phi_{o2}^d + \phi_{11}^d + \phi_{12}^d + \phi_o + \phi_1 ,$$

- ϕ_o - fala bezpośrednia pochodząca ze źródła rzeczywistego S,
- ϕ_1 - fala pochodząca ze źródła pozornego S', będącego zwierciadlanym odbiciem źródła S w płaszczyźnie podłoża,
- ϕ_{o1}^d - fala dyfrakcyjna pochodząca ze źródła S, docierająca bezpośrednio do punktu obserwacji,
- ϕ_{11}^d - fala dyfrakcyjna pochodząca ze źródła S, docierająca do punktu obserwacji po odbiciu od podłoża za ekranem,
- ϕ_{o2}^d - fala dyfrakcyjna pochodząca ze źródła S', docierająca do punktu obserwacji bezpośrednio,
- ϕ_{12}^d - fala dyfrakcyjna pochodząca ze źródła S', docierająca do punktu obserwacji po odbiciu od podłoża za ekranem.

W przypadku pojawienia się drugiej płaszczyzny odbijającej odpowiadającej fasadzie budynku chronionego przez ekran /rys.4.5/ liczba fal docierających do punktu obserwacji zwiększa się. Do punktu obserwacji, w zależności od jego położenia będzie docierało od zera do czterech fal geometrycznych. Ponadto, na skutek odbić od trzech płaszczyzn: ekranu, podłoża i fasady, do punktu obserwacji będą docierały fale dyfrakcyjne których liczba też będzie zależała od położenia punktu obserwacji.

Sumowanie fal geometrycznych, ze względu na możliwość określenia potencjału fali odbitej (4.1) jest stosunkowo proste.

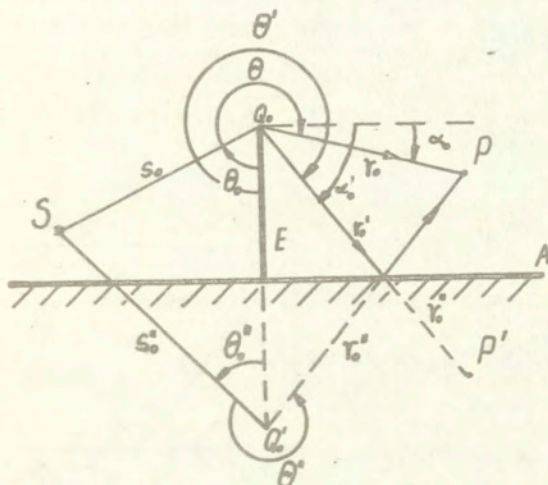


Rys.4.5. Fale docierające do punktu obserwacji w przypadku istnienia dwóch dodatkowych płaszczyzn odbijających.

Obliczenie potencjału akustycznego fali dyfrakcyjnej odbitej od podłoża jest bardziej skomplikowane. Ze wzoru (3.21) widać, że potencjał fali dyfrakcyjnej jest nie tylko funkcją wysokości ale również funkcją kątów θ i θ_0 określających położenie źródła i punktu obserwacji względem krawędzi /rys.4.6/, a właściwie ich różnicy $\theta - \theta_0$. Obliczanie potencjału fali dyfrakcyjnej w punkcie P metodą wprowadzenia źródeł pozornych Q_n prowadzi do błędnego określenia różnicy kątów $\theta - \theta_0$. Na rys.4.6 przedstawiono kąty θ'' i θ_0'' które pojawiają się przy zwiarcianym odbiciu punktu Q_0 w płaszczyźnie podłoża. Kąt θ_0'' , określony jako kąt pomiędzy wektorem S_0'' , a płaszczyzną ekranu nie odpowiada kątowi θ_0 między wektorem S_0 i płaszczyzną ekranu. Kąty te są sobie równe tylko w jednym przypadku: gdy źródło S znajduje się na płaszczyźnie A. Kąt θ'' odpowiada kątowi θ' czyli różnica we wzorze (3.21) $\theta' - \theta_0 \neq \theta'' - \theta_0''$, czyli nie jest prawidłowo określona.

Można spróbować postąpić inaczej. Pozostawić nieruchomo punkt Q_0 na krawędzi ekranu, natomiast wprowadzić pojęcie pozor-

nego punktu obserwacji P'_k /rys.4.6/ jako odbicie zwierciadlane punktu P względem płaszczyzny A. Jak widać z rys.4.6 kąt θ_0 , jest kątem między wektorem S_0 i płaszczyzną ekranu, a kąt θ' między wektorem r'_0 i płaszczyzną ekranu. Czyli są zachowane wymagane relacje kątowe. Należy jeszcze przeprowadzić dowód, że właściwa relacja kątowa zostaje zachowana nie tylko dla jednokrotnego odbicia, ale i dla odbić wielokrotnych, co zostanie zrobione poniżej.



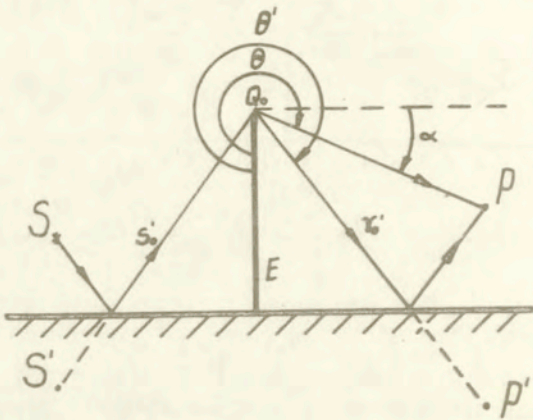
Rys.4.6. Fala dyfrakcyjna docierająca do punktu obserwacji po odbiciu od podłoża.

Ponieważ, jak widać z rys.4.6 kąt θ_0 pozostaje stały /źródło S i punkt Q_0 na krawędzi pozostają nieruchome/, wystarczy przeprowadzić dowód dla kąta θ_k będących kątami jakie tworzą wektory r_k określające położenie k-tego pozornego punktu obserwacji P_k z płaszczyzną ekranu. Dla wygody dowód zostanie przeprowadzony dla kąta $\alpha = \theta - (3/2)\pi$ /rys.4.6/, który jest kątem między prostą prostopadłą do ekranu i prostą łączącą punkt Q_0 z pozornym punktem obserwacji (r_0 ; r'_0 ; r'_0 ;.....). W dowodzie zostaną uwzględnione zarówno relacje kątowe /kąt α / jak i odległościowe /zachowanie długości drogi przebytej przez falę od źródła do

punktu obserwacji w trakcie kolejnych odbić/.

Dewód ten będzie słuszny również dla przypadku gdy odbicia S' od podłoża A fali ze źródła rzeczywistego S w drodze do punktu Q_0 /krawędzi ekranu/. Jak widać z rys.4.7 w tym przypadku kąt θ_0 jest kątem między wektorem S'_0 poprowadzonym ze źródła S' do punktu krawędzi Q_0 , a płaszczyzną ekranu.

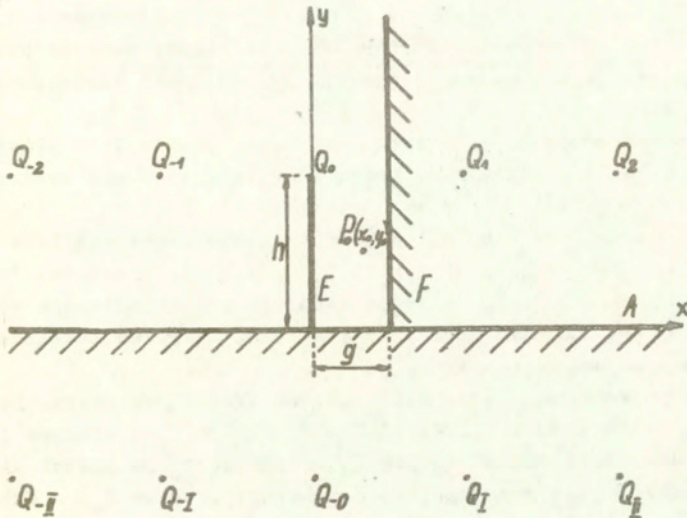
Odbicie fali wychodzącej ze źródła S od podłoża A przed ekranem jest reprezentowane przez źródło S' . Oddziaływanie fali ze źródła S' z krawędzią ekranu prowadzi do powstania fali dyfrakcyjnej, której odbicia za ekranem opisuje się w ten sam sposób jak dla fali powstałej na skutek oddziaływania z krawędzią ekranu fali ze źródła S .



Rys.4.7. Odbicia za ekranem fali dyfrakcyjnej powstałej na skutek oddziaływania z krawędzią fali ze źródła S' będącego odbiciem źródła S w płaszczyźnie podłoża A .

4.2. Ekran i dwie dodatkowe płaszczyzny odbijające, podłoże i fasada chronionego budynku.

Rozpatrzenie zostanie przypadek gdy obok ekranu E istnieją dwie płaszczyzny odbijające /rys.4.8/. Jest to typowa sytuacja w urbanistyce. Płaszczyzna A obrazuje podłoże, a płaszczyzna F fasadę budynku.



Rys.4.8. Powstawanie źródeł pezernych w przypadku istnienia trzech płaszczyzn odbijających E, A, F, gdy źródłem jest punkt Q_0 krawędzi ekranu E.

Jak wynika z rozważań zamieszczonych w rozdziale drugim punkt krawędzi ekranu Q_0 stanowi źródło wysyłające falę dyfrakcyjną. Ekran ma skończoną wysokość h , natomiast płaszczyzny A i F są nieograniczone. Punktem obserwacji jest punkt o współrzędnych (x_0, y_0) . Odległość między ekranem i fasadą F wynosi g /rys.4.8/.

Do punktu obserwacji P_0 oprócz fali dyfrakcyjnej docierającej bezpośrednio ze źródła Q_0 dotrą fale dyfrakcyjne, które przed dotarciem do punktu obserwacji uległy odbiciu od płaszczyzn E, A, F.

Gdyby źródło fali dyfrakcyjnej Q_0 było wszechkierunkowym źródłem punktowym fale odbite od płaszczyzn E, A, F można by traktować jako fale pochodzące od zwierciadlanych odbić punktu Q_0 w płaszczyznach E, A, F. Ponieważ źródło Q_0 jest źródłem kierunkowym, zwierciadlane odbicia punktu Q_0 w płaszczyznach E, A,

P będące źródłami pozornymi musiałyby, oprócz warunku równości drogi jaką fala przebywa ze źródła Q_0 do punktu obserwacji P_0 , na skutek kolejnych odbić i odległości między odpowiednimi źródłami pozornymi a punktem obserwacji P_0 , zachować odpowiednie relacje katowe.

Wprowadzenie źródeł pozornych jako odbić punktu Q_0 w płaszczyznach E, A, F spełnia zależności odległościowe, nie spełnia katowych, co zostanie niżej wyjaśnione.

Zależności katowe i odległościowe będą spełnione gdy jako falę odbitą, docierającą do punktu P_0 będzie się traktować falę docierającą ze źródła Q_0 do odpowiedniego zwierciadlanego odbicia punktu P_0 kolejne w płaszczyznach E, A, F, co zostanie przedstawione poniżej.

Najpierw udowodnimy, że odległość od źródła pozornego, będącego odbiciem źródła Q_0 , do punktu P_0 /która jak wiadomo jest równa drodze przebytej od źródła Q_0 do punktu P_0 na skutek kolejnych odbić/ jest równa odległości między źródłem Q_0 , a odpowiednim zwierciadlanym odbiciem punktu P_0 .

Jeżeli źródło Q_0 ma współrzędne $Q_0(0, h)$ /rys.4.8/, to współrzędne y-owe źródeł pozornych położonych powyżej płaszczyzny A będą równe:

$$y_{0n} = h,$$

a poniżej płaszczyzny A:

$$y_{0n} = -h.$$

Współrzędne x-owe źródeł pozornych położonych zarówno powyżej jak i poniżej płaszczyzny A będą równe :

$$x_{0n} = 2gn, \quad n \in \mathbb{C}, \quad (4.6)$$

\mathbb{C} - zbiór liczb całkowitych / $\mathbb{C} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ /

Odległości między źródłami pozornymi, a punktem obserwacji $P_0(x_0, y_0)$ wynosić będą:

$$A_n = \sqrt{(y_0 \pm h)^2 + (x_0 - 2gn)^2}. \quad (4.7)$$

Ponieważ rzeczywisty punkt obserwacji ma współrzędne $P_0 (x_0, y_0)$ /rys.4.9/, to współrzędne y-owe pozornych punktów obserwacji znajdujących się powyżej płaszczyzny A będą wynosiły:

$$y_{P_k} = y_0,$$

a położonych poniżej płaszczyzny A:

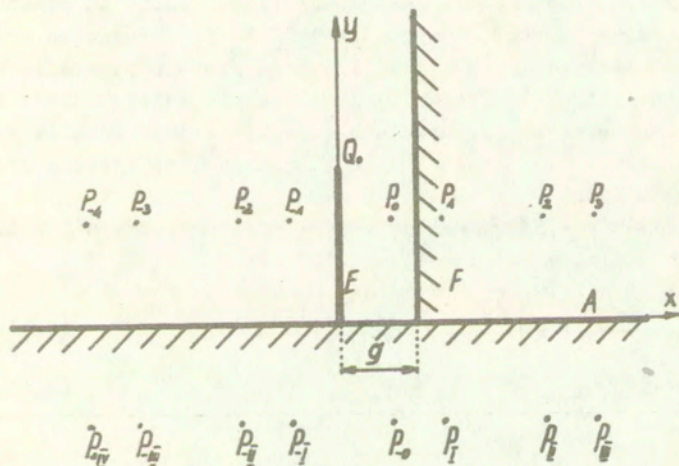
$$y_{P_k} = -y_0.$$

Współrzędne x-owe pozornych punktów obserwacji leżących zarówno powyżej jak i poniżej płaszczyzny A można obliczyć z wyrażenia:

$$x_{P_k} = \frac{g(2k+1) + (-1)^k (2x_0 - g)}{2}. \quad (4.8)$$

Odległości między źródłem rzeczywistym Q_0 , a pozornym punktem obserwacji będą wynosić:

$$A_2 = \sqrt{(h \pm y_0)^2 + (x_{P_k})^2}. \quad (4.9)$$



Rys.4.9. Powstawanie pozornych punktów obserwacji gdy rzeczywisty punkt obserwacji znajduje się między trzema płaszczyznami odbijającymi B,A,F.

Aby droga przebyta przez falę ze źródła Q_0 do punktu obserwacji P_0 po kolejnych odbiciach od płaszczyzny E, A, F była równa odległości pomiędzy źródłem rzeczywistym Q_0 , a pozornym punktem obserwacji P_k spełniona musi być równość:

$$A_1 = A_2 .$$

Przyrównując (4.7) do (4.8) otrzymuje się zależność:

$$(x_{Pk})^2 = (x_0 - 2dn)^2 . \quad (4.10)$$

Pe podstawieniu (4.8) do (4.10) można stwierdzić, że równość (4.10) zachodzi tylko dla $k \geq 0$, co oznacza że pozornych punktów obserwacji jest dwa razy więcej niż źródeł pozornych. Jest to zrozumiałe /rys.4.8/, jeżeli zauważy się, że ponieważ, źródło Q_0 położone jest w płaszczyźnie E to nie powstanie źródło pozorne pierwszego rzędu jako odbicie zwierciadlane od płaszczyzny E, co miałyby miejsce gdyby źródło Q_0 było odsumięte od płaszczyzny E /rząd źródła jest równy ilości odbić od płaszczyzn ograniczających, których dokona fala docierając ze źródła do punktu obserwacji/. W sytuacji jak na rys.4.8 powstanie źródło pozorne pierwszego rzędu Q_1 jako odbicie zwierciadlane źródła Q_0 od płaszczyzny F. Źródło Q_1 powstaje jako odbicie zwierciadlane źródła Q_1 w płaszczyźnie E, a więc jest źródłem drugiego rzędu itd.

Na podstawie (4.8) można znaleźć relację pomiędzy n i k dla których spełniona jest równość (4.10) :

$$n \leq 0 , \quad k = -2n , \quad (4.11.a)$$

$$n > 0 , \quad k = 2n - 1 . \quad (4.11.b)$$

Ponieważ równość (4.10) jest spełniona dla k dodatnich widać z rys.4.8 i rys.4.9, że nastąpiła transformacja źródeł pozornych Q_n znajdujących się po lewej stronie płaszczyzny E i prawej płaszczyzny F, na pozorne punkty obserwacji P_k , leżące po prawej stronie płaszczyzny F (bo $k \geq 0$).

Droga jaką przebędzie fala pomiędzy źródłem Q_0 , a punktem obserwacji P_0 w procesie kolejnych odbić równa jest odległości pomiędzy źródłem Q_0 , a pozornym punktem obserwacji P_k znajdującym się po prawej stronie płaszczyzny F , nad lub pod płaszczyzną A .

Należy jeszcze wykazać, że dla danego punktu obserwacji została zachowana relacje katowe.

Źródła pozorne występujące po lewej stronie płaszczyzny E reprezentowane są przez pozorne punkty obserwacji P_k o numerach parzystych, występujące po prawej stronie płaszczyzny F , a źródła pozorne występujące po prawej stronie płaszczyzny F reprezentowane są przez pozorne punkty obserwacji o numerach nieparzystych, występujące po prawej stronie płaszczyzny F .

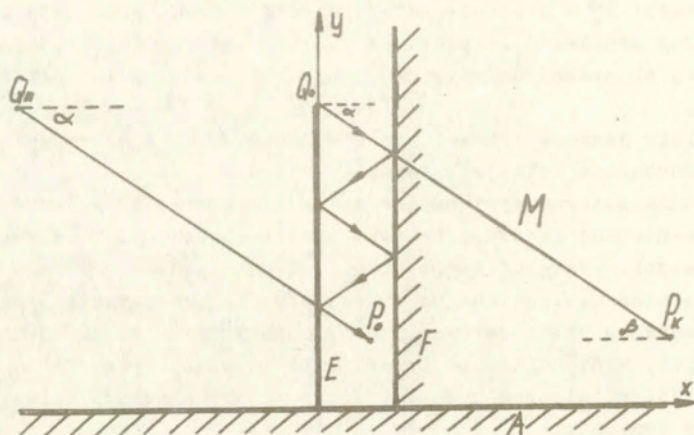
Aby udowodnić spełnienie relacji katowych należy rozważyć cztery przypadki:

- przypadek pierwszy - fala dociera do punktu obserwacji P_0 po odbiciach od płaszczyzn E i F , ostatnie odbicie następuje od płaszczyzny E ,
- przypadek drugi - fala dociera do punktu obserwacji P_0 po odbiciach od płaszczyzn E i F , ostatnie odbicie następuje od płaszczyzny F ,
- przypadek trzeci - fala dociera do punktu obserwacji P_0 po odbiciach od płaszczyzn E i F oraz jednym odbiciu od płaszczyzny A , ostatnie odbicie następuje od płaszczyzny E lub A ,
- przypadek czwarty - fala dociera do punktu obserwacji P_0 po odbiciach od płaszczyzn E i F oraz jednym odbiciu od płaszczyzny A , ostatnie odbicie następuje od płaszczyzny F lub A .

Sytuacja w pierwszym przypadku /rys.4.10/ jest reprezentowana przez źródło pozorne Q_n położone na lewo od płaszczyzny E $N < 0$. Źródło Q_n wysyła falę pod kątem α do normalnej płaszczyzny E . Fala ta po odbiciach od płaszczyzn E i F dociera do punktu P_0 . Droga jaką przebywa fala docierając do punktu P_0 równa jest odległości $Q_n P_0$ i równa odległości $Q_0 P_k$. Aby zachowane były relacje katowe punkt obserwacji P_k musi leżeć na prostej M .

Znając położenie punktów $Q_n(x_{Qn}, h)$ i $P_0(x_0, y_0)$ /rys.4.10/ można określić kąt α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h - y_0}{x_0 - x_{Qn}} \quad (4.12)$$



Rys.4.10. Przypadek gdy fala dociera do punktu obserwacji P_k po odbiciach od płaszczyzn E i F, przy ostatnim odbiciu od płaszczyzny E.

Aby punkt P_k leżał na prostej M kąt β /kąt pomiędzy prostą przechodzącą przez punkty $Q_0(0, h)$ i $P_k(x_{Pk}, y_0)$, a normalną do płaszczyzn E i F/ musi być równy kątowi α , czyli:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h - y_0}{x_{Pk}}. \quad (4.13)$$

Ponieważ $x_{Q_n} = 2ng, n \leq 0$, a odpowiada mu punkt $P_k(x_{Pk}, y_0)$, gdy $k = -2n$, to po wstawieniu do (4.13) wyrażen (4.8), (4.11a) otrzymuje się:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h - y_0}{x_0 - 2gn} = \frac{h - y_0}{x_0 - x_{Q_n}} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.14)$$

Sytuacja w przypadku drugim /rys.4.11/ jest reprezentowana przez źródło pozorne Q_n położone na prawo od płaszczyzny E, nad płaszczyzną A, $n > 0$. Źródło Q_0 wysyła falę pod kątem α do normalnej do płaszczyzny E, która po odbiciach od płaszczyzn E i F dociera do punktu obserwacji P_k .

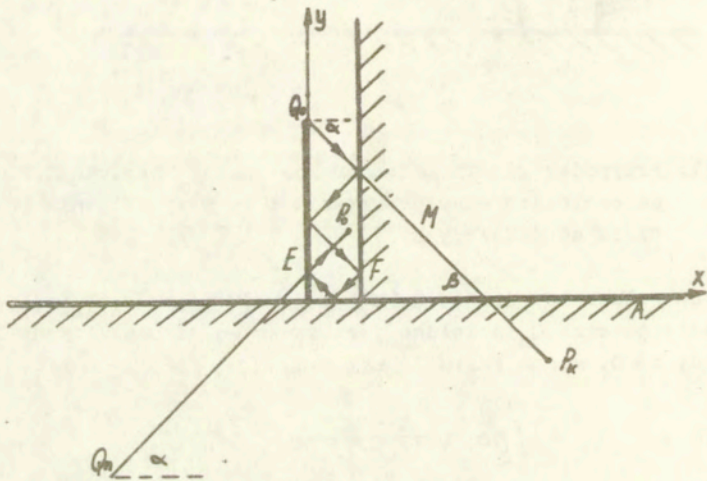
W przypadku trzecim /rys.4.12/ źródło pozorne Q_n położone jest na lewo od płaszczyzny E, $n \leq 0$, poniżej płaszczyzny A.

Znając położenie punktów $Q_n(x_{Qn}, -h)$, $P_o(x_o, y_o)$, $P_k(x_{Pk}, -y_o)$ można określić kąt α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h + y_o}{x_o - x_{Qn}}, \quad n \leq 0 \quad (4.18)$$

oraz kąt β :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h + y_o}{x_{Pk}}. \quad (4.19)$$



Rys.4.12. Przypadek gdy fala dociera do punktu obserwacji P_o po odbiciach od płaszczyzn E i F oraz jednym odbiciem od płaszczyzny A, przy ostatnim odbiciu od płaszczyzny E lub A.

Po podstawieniu wyrażeń (4.8) i (4.11a) do (4.19) otrzymuje się :

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{h+y_0}{x_0-2gn} = \frac{h+y_0}{x_0-x_{qn}} = \operatorname{tg}\alpha. \quad (4.20)$$

W przypadku czwartym źródło pozorne Q_n położone jest na prawo od płaszczyzny E, poniżej płaszczyzny A /rys.4.13/.

Z położenia punktów $Q_n(x_{qn}, -h)$, $P_0(x_0, y_0)$, $P_k(x_{pk}, -y_0)$ można określić kąt α i kąt β :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{h+y_0}{x_{qn}-x_0}, \quad n > 0. \quad (4.21)$$

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{h+y_0}{x_{pk}}. \quad (4.22)$$

Po podstawieniu do (4.22) wyrażeń (4.8) i (4.11b) otrzymuje się:

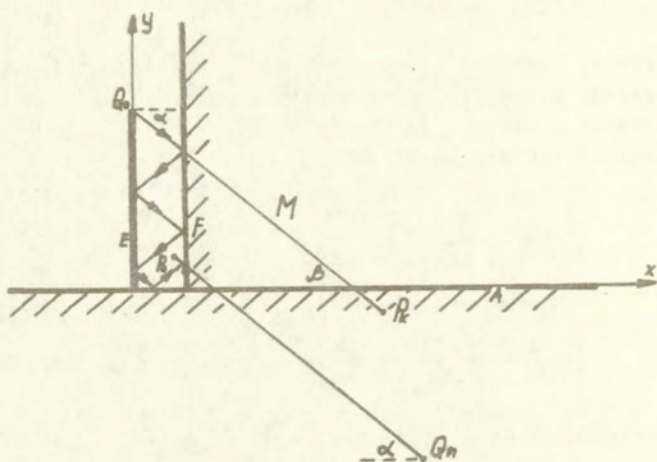
$$\operatorname{tg}\beta = \frac{h+y_0}{2gn-x_0} = \frac{h+y_0}{x_{qn}-x_0} = \operatorname{tg}\alpha. \quad (4.23)$$

Zostało więc pokazane, że przyjmując do obliczeń potencjałów akustycznych fal dyfrakcyjnych pozorne punkty obserwacji P_k zachowuje się zarówno długości dróg przebytych przez falę jak i odpowiednie relacje katowe.

Dalsze rozważania będą miały na celu określenie rzędu pozornych punktów obserwacji $/P_k/$, dla których zostanie między innymi określona liczba odbić fali dyfrakcyjnej od ekranu, fasady i podłoża, jakiemu ulega fala dyfrakcyjna na drodze do punktu obserwacji. Liczba tych odbić od kolejnych płaszczyzn na drodze do punktu obserwacji zdeterminowana jest przez geometrię układu: źródło, ekran, podłoże, fasada, punkt obserwacji oraz współczynniki odbicia.

4.3. Określenie liczby fal geometrycznych i dyfrakcyjnych docierających do punktu obserwacji.

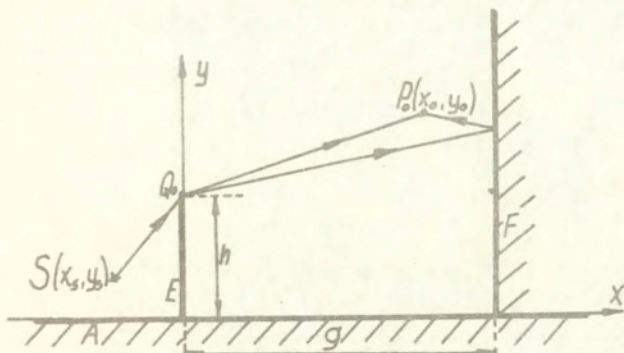
Jak pokazano /rys.4.5/ do punktu obserwacji dociera w zależności od jego położenia od zera do czterech fal geometrycznych.



Rys.4.13. Przypadek gdy fala dociera do punktu obserwacji P_0 po odbiciach od płaszczyzn E i F oraz jednym odbiciem od płaszczyzny A, przy statnym odbiciu od płaszczyzny F lub A.

Ponadto do punktu obserwacji oprócz fali dyfrakcyjnej, która dotrze do niego bezpośrednio po ugięciu na krawędzi, będą docierały fale dyfrakcyjne, które po ugięciu na krawędzi będą ulegały odbiciu od występujących w układzie płaszczyzn. Liczba fal dyfrakcyjnych docierających do punktu obserwacji zależy od jego położenia w układzie trzech płaszczyzn: ekranu E o wysokości h stojącego na podłożu A w odległości g od fasady F ekranowanego budynku.

Na przykład, gdy punkt obserwacji P_0 położony jest na wysokości większej niż wysokość ekranu h /rys.4.14/ docierać do niego będą między innymi : fala, która bezpośrednio po ugięciu dojdzie do punktu obserwacji $/Q_0, P_0/$, fala, która po ugięciu ulega odbiciu od fasady $/Q_0, F, P_0/$, oraz inne fale, które po ugięciu na krawędzi ekranu będą ulegały wielokrotnym odbiciom między trzema płaszczyznami: podłożem A, fasadą F i ekranem E.

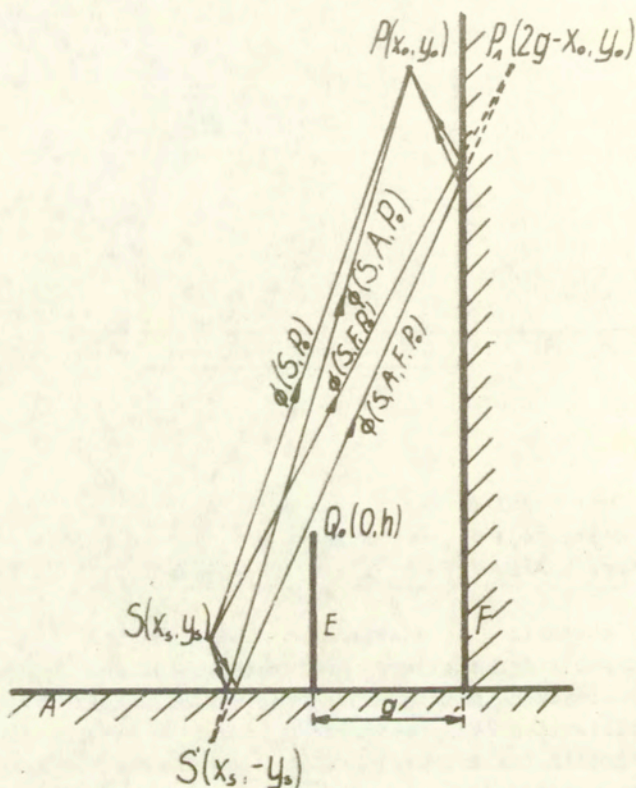


Rys.4.14. Dwie z fal dyfrakcyjnych docierających do punktu obserwacji P_0 , w przypadku gdy jest on położony na wysokości większej niż wysokość ekranu h .

Poniżej zostanie przedstawiona metoda obliczania liczby fal geometrycznych i dyfrakcyjnych docierających do punktu obserwacji P_0 . Wykorzystano metodą źródeł pozornych, ustalając odpowiednie położenia źródeł pozornych Q_n będących zwierciadlanymi odbiciami źródła fal dyfrakcyjnych Q_0 , położonego na krawędzi ekranu. Znajomość rzędu źródła pozornego Q_n , pozwala ustalić położenie i rząd pozornego punktu obserwacji P_k . Punkt P_k , jak wykazane w rozdziale 4.3 jest punktem w którym potencjał akustyczny fali dyfrakcyjnej (3.10) jest równy potencjałowi fali ugiętej na krawędzi, która uległa określonym przez rząd punktu k , odbiciem między płaszczyznami F , A , E .

4.3.1. Określenie liczby fal geometrycznych.

Rys.4.15 pokazuje sposób docierania każdego z czterech rodzajów fal geometrycznych ze źródła $S(x_s, y_s)$ do punktu obserwacji $P_0(x_0, y_0)$. Oczywiście liczba docierających fal jest zależna od wysokości y_0 punktu P_0 nad podłożem A .



Rys.4.15. Schemat docierania czterech rodzajów fal geometrycznych ze źródła S do punktu obserwacji P_0 .

Na rys.4.15 widać fale docierające do punktu obserwacji P_0 po odbiciu od podłoża A i fasady F. Reprezentowane są one poprzez fale geometryczne ze źródeł: rzeczywistego S lub pozornego S' ; docierające do punktów obserwacji rzeczywistego P_0 lub pozornego P_1 .

W celu określenia liczby fal geometrycznych docierających do punktu obserwacji P_0 , określone zostaną warunki docierania do

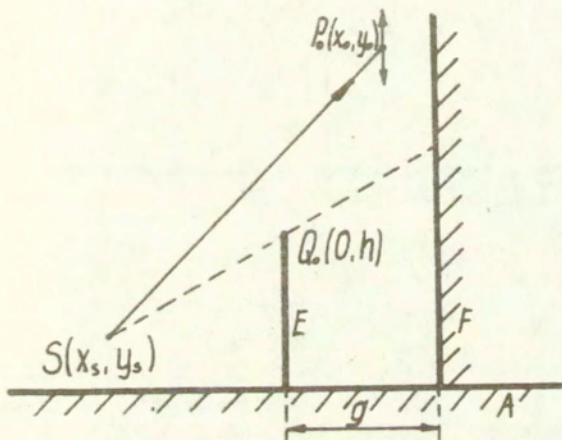
niegę każdej z czterech fal geometrycznych.

a/ fala geometryczna docierająca do punktu obserwacji

$P_0(x_0, y_0)$ bezpośrednio ze źródła $S(x_s, y_s)$ na drodze S, P_0
/rys.4.16/

Do punktu obserwacji P_0 dotrze fala geometryczna SP_0 gdy będzie on położony na lub powyżej prostej łączącej punkty S i Q co prowadzi do nierówności:

$$y_0 > \frac{hx_s + x_0 y_s - hx_0}{x_s} \quad (4.24)$$



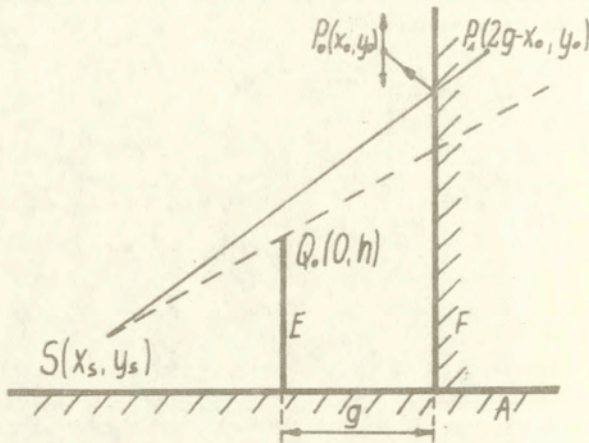
Rys.4.16. Obszary docierania fali geometrycznej SP_0 .

b/ fala geometryczna docierająca do punktu obserwacji

$P_0(x_0, y_0)$ ze źródła S po odbiciu od fasady F , na drodze S, F, P_0 /rys.4.17/

Do punktu obserwacji P_0 dotrze fala geometryczna SFP_0 gdy pozorny punkt obserwacji P_1 będzie położony na lub powyżej prostej SQ_0 , co prowadzi do utrzymania nierówności:

$$y_0 \gg \frac{hx_s - x_0 y_s + hx_0 + 2gy_0 - 2hg}{x_s}, \quad (4.25)$$



Rys.4.17. Obszary docierania fali geometrycznej SFP₀.

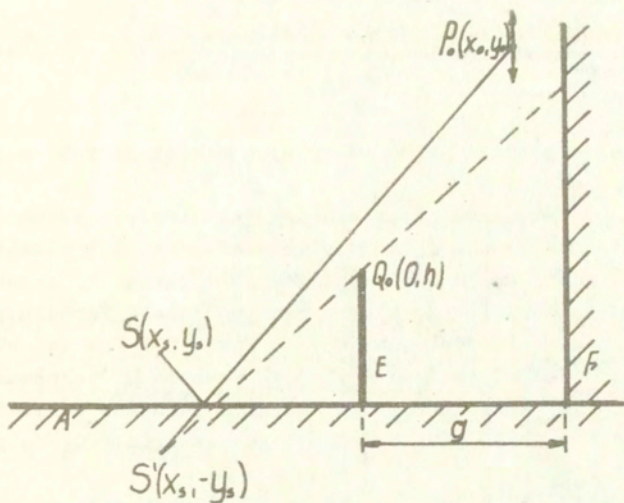
c/ fala geometryczna docierająca do punktu obserwacji P₀(x₀, y₀) ze źródła S(x_s, y_s) po odbiciu od pedłoża A, na drodze S, A, P₀ /rys.4.18/.

Do punktu obserwacji P₀ detrze fala geometryczna SAP₀, gdy będzie en położony na lub powyżej prostej S₁Q₀, ce daje nierówneść :

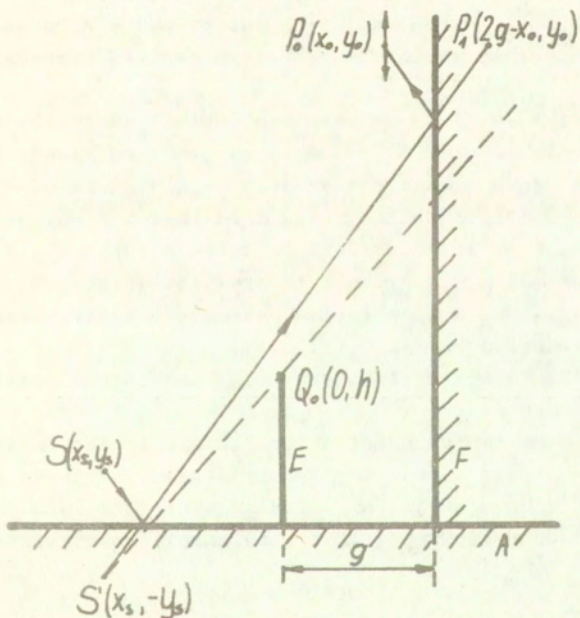
$$y_0 \gg \frac{hx_s - x_0 y_s - hx_0}{x_s}, \quad (4.26)$$

d/ fala geometryczna docierająca do punktu obserwacji P₀(x₀, y₀) ze źródła S(x_s, y_s) , na drodze S, A, P, P₀ /rys.4.19/.

Do punktu obserwacji detrze fala geometryczna SAPP₀, gdy pozerny punkt obserwacji P₁ będzie położony na lub powyżej prostej



Rys. 4.18. Obszary docierania fali geometrycznej SAP.



Rys. 4.19. Obszary docierania fali geometrycznej SAFP.

$S_1 Q_0$ ce prowadzi do nierówności:

$$y_0 \gg \frac{hx_s + x_s y_s + hx_s - 2gy_s - 2hg}{x_s} \quad (4.27)$$

4.3.2. Określenie liczby fal dyfrakcyjnych decierających do punktu obserwacji.

W przypadku fal dyfrakcyjnych źródłem jest krawędź ekranu Q_0 . Fale dyfrakcyjne ze źródła Q_0 mogą ulec skończonej lub nieskończonej liczbie odbić od płaszczyzn fasady F i ekranu E. Ponadto mogą ulec jednemu odbiciu od płaszczyzny podłoża A /źródła pezerne Q'_n położone poniżej płaszczyzny A rys.4.20/ lub też nie ulec żadnemu odbiciu od podłoża A /źródła pezerne Q''_n położone powyżej płaszczyzny A rys.4.20/. Na rys.4.20 pokazane schemat decierania dwóch rodzajów fal dyfrakcyjnych ze źródła Q_0 do punktu obserwacji P_0 :

- $\phi(Q_0, F, E, A, F, E, P_0)$ - ostatnie odbicie nastąpiło od ekranu E /źródło pezerne Q''_2 położone na lewo od ekranu/. Aby nastąpiło ostatnie odbicie od ekranu musi ono nastąpić na wysokości mniejszej bądź równej wysokości ekranu E /prosta $Q''_2 P_0$ musi przecinać ekran w punkcie położonym poniżej krawędzi ekranu Q_0 /.
- $\phi(Q_0, F, E, A, F, E, F, P_0)$ - ostatnie odbicie nastąpiło od fasady F /źródło pezerne Q'_3 położone na prawo od fasady F/. Z uwagi na to, że wysokość fasady jest dużo większa od wysokości ekranu ostatnie odbicie nastąpi od fasady F gdy przedostatnie nastąpi od ekranu E /prosta łącząca punkt Q''_2 z punktem C powstałym jako przecięcie prostej łączącej Q'_3 z punktem P_0 rys.4.20, musi przecinać ekran w punkcie położonym poniżej krawędzi ekranu Q_0 /.

Podobnie będzie dla źródeł pezernych Q''_n położonych powyżej płaszczyzny podłoża A.

Poniżej pokazana zostanie metoda obliczania liczby pezernych punktów obserwacji /ce odpowiada liczbie decierających do rzeczywistego punktu obserwacji fal dyfrakcyjnych/ w zależności od geometrii układu płaszczyzn A, E, F i położenia rzeczywistego punktu obserwacji P_0 .

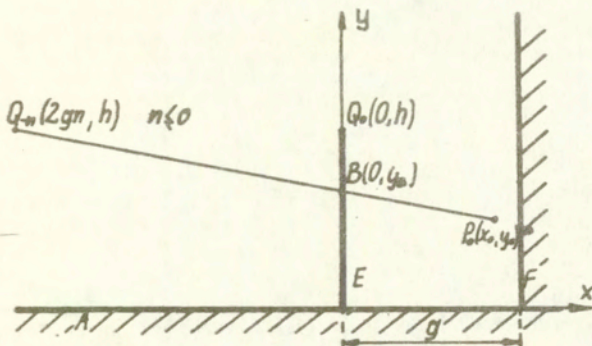
Obliczony zostanie maksymalny rząd źródeł pozornych Q_n , gdy krawędź ekranu traktowana jest jako źródło, a następnie na podstawie (4.11a) i (4.11b) określony zostanie rząd pozornych punktów obserwacji /odpowiadający ilości odbić jakich doznaje fala dyfrakcyjna na drodze od krawędzi do rzeczywistego punktu obserwacji/.

Rezultatem zostaną cztery przypadki:

- a/ odbicia fali ugiętej na krawędzi Q_0 zachodzą między płaszczyznami E i F, a ostatnie odbicie następuje od płaszczyzny E /źródła pozorne Q_{-n} położone są na lewo od płaszczyzny E powyżej płaszczyzny A, co odpowiada pozornym punktom obserwacji P_k położonym powyżej płaszczyzny A, $k = -2n$ /
- b/ odbicia fali ugiętej na krawędzi ekranu Q_0 zachodzą między płaszczyznami E i F, a ostatnie odbicie następuje od płaszczyzny F /źródła pozorne Q_n położone są na prawo od płaszczyzny F, powyżej płaszczyzny A, co odpowiada pozornym punktom obserwacji P_k położonym powyżej płaszczyzny A $k = 2n - 1$ /,
- c/ odbicia fali ugiętej na krawędzi ekranu Q_0 zachodzą między płaszczyznami E i F dodatkowo pojawia się jedno odbicie od płaszczyzny A, a ostatnie odbicie następuje od płaszczyzny E /źródła pozorne Q_{-n} położone są na lewo od płaszczyzny E powyżej płaszczyzny A, co odpowiada pozornym punktom obserwacji P_k położonym powyżej A, $k = -2n$ /,
- d/ odbicia fali ugiętej na krawędzi ekranu Q_n zachodzą między płaszczyznami E i F, dodatkowo pojawia się jedno odbicie od płaszczyzny A, a ostatnie odbicie następuje od płaszczyzny F /źródła pozorne Q_n położone są na prawo od płaszczyzny F, powyżej płaszczyzny A, co odpowiada pozornym punktom obserwacji P_k położonym powyżej płaszczyzny A, $k = 2n - 1$ /,
- ad.a/aby ostatnie odbicie nastąpiło od płaszczyzny E /rys.4.21/ prosta łącząca źródło pozorne $Q_{(-n)}$ z punktem obserwacji P_0 musi przecinać ekran E w punkcie B na wysokości mniejszej bądź równej wysokości ekranu h:

$$y_b \leq h, \quad (4.28)$$

$$y_b = y_0 - \frac{x_0(h - y_0)}{2gn - x_0} \cap n \leq 0. \quad (4.29)$$



Rys.4.21. Przypadek gdy źródło pozorne położone jest powyżej płaszczyzny A, a ostatnie odbicie następuje od płaszczyzny E.

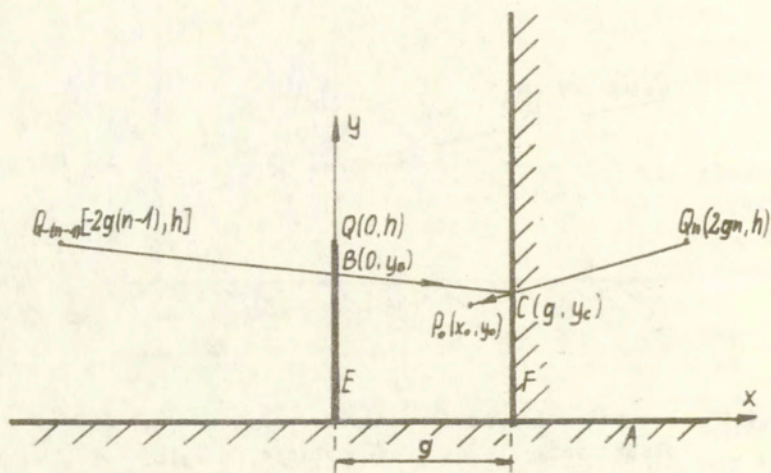
Wstawiając (4.29) do (4.28) można uzyskać zależność:

$$(y_0 - h)2gn \geq 0 \quad \wedge \quad n \leq 0 \quad (4.30)$$

W celu znalezienia n z zależności (4.30) zostaną rozpatrzone dwa przypadki:

- a1/ $y_0 \leq h$ (4.31)
 nierówności (4.30) i (4.31) spełnione są dla każdego $n \leq 0$
- a2/ $y_0 > h$ (4.32)
 nierówności (4.30) i (4.32) spełnione są dla $n = 0$,

ad. b/aby ostatnie odbicie reprezentowane przez źródło pozorne Q_n nastąpiło od płaszczyzny fasady /rys.4.22/ przedostatnie odbicie od płaszczyzny E reprezentowane przez pozorne źródło $Q_{-(n-1)}$ musi następować na wysokości y_B mniejszej bądź równej wysokości ekranu h . Prosta łącząca punkty $Q_{-(n-1)}$ i C musi przecinać płaszczyznę E w punkcie $B(0, y_B)$:



Rys. 4.22. Przypadek gdy źródło pozorne jest położone powyżej płaszczyzny A, a ostatnie odbicie następuje od płaszczyzny F.

$$y_B \leq h, \quad (4.33)$$

$$y_B = \frac{2(h-y_0)(n-1)g}{-2ng+x_0} + h \quad \wedge \quad n \geq 1. \quad (4.34)$$

Wstawiając y_B (4.34) do nierówności (4.33) uzyskuje się nierówność:

$$\frac{g(n-1)(h-y_0)}{2gn-x_0} \geq 0 \quad \wedge \quad n \geq 1. \quad (4.35)$$

Z uwagi na to, że $g > 0$, $2gn-x_0 > 0$, nierówność (4.35) można przekształcić w postać:

$$(h-y_0)(n-1) \geq 0 \quad \wedge \quad n \geq 1. \quad (4.36)$$

Aby znaleźć n z nierówności (4.36) należy rozpatrzyć dwa przypadki:

$$b1/ y_0 \leq h \quad (4.37)$$

nierówności (4.36) i (4.37) spełnione są dla każdego n większego bądź równego 1,

$$b2/ y_0 > h \quad (4.38)$$

nierówności (4.36) i (4.38) spełnione są dla $n = 1$

ad.c/aby ostatnie odbicie nastąpiło od płaszczyzny E /rys.4.23/ prosta łącząca źródło pozorne Q_{-n} z punktem P_0 musi przecinać ekran E w punkcie B położonym na wysokości y_B mniejszej bądź równej wysokości ekranu h :

$$y_B \leq h, \quad (4.39)$$

$$y_B = y_0 - \frac{x_0(y_0 + h)}{(x_0 - 2gn)} \quad \cap \quad n \leq 0. \quad (4.40)$$

Wstawiając y_B z równania (4.40) do nierówności (4.39) uzyskuje się nierówność:

$$ng(h - y_0) \leq hx_0 \quad \cap \quad n \leq 0. \quad (4.41)$$

Podobnie jak dla przypadków a i b rozważane są dwie możliwości:

$$c1/ y_0 \leq h \quad (4.42)$$

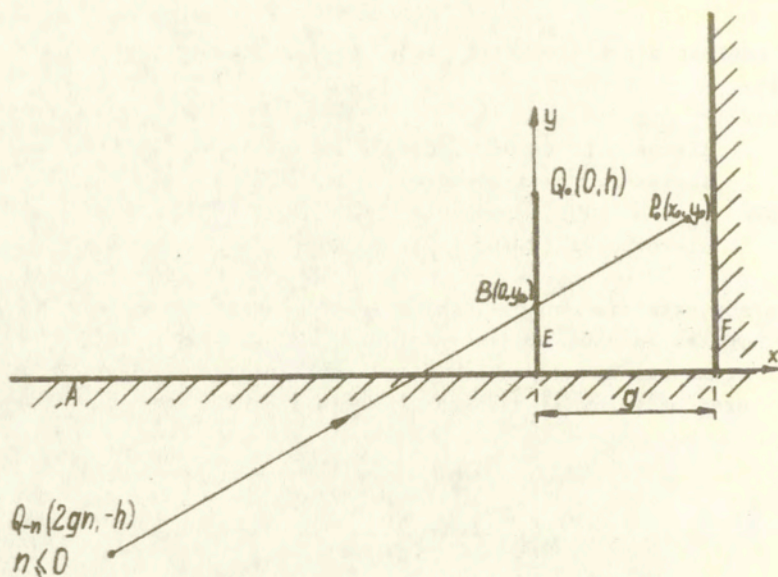
nierówności (4.41) i (4.42) spełnione są dla każdego n mniejszego bądź równego zero,

$$c2/ y_0 > h \quad (4.43)$$

nierówności (4.41) i (4.43) są spełnione dla n spełniającego warunek:

$$-n \leq \frac{hx_0}{g(y_0 - h)} \quad \cap \quad n \leq 0, \quad (4.44)$$

ad.d/aby ostatnie odbicie /reprezentowane przez źródło pozorne Q_n / nastąpiło od płaszczyzny fasady F, przedostatnie odbicie /reprezentowane przez źródło pozorne $Q_{-(n-1)}$ / od płaszczyzny ekranu E musi nastąpić na wysokości ekranu h /rys. 4.24/.



Rys.4.23. Przypadek gdy źródło pozorne położone jest pomiędzy płaszczyzny A, a ostatnie odbicie nastąpiło od płaszczyzny E.

Prosta łącząca punkty $Q_{-(n-1)}$ i C przecina ekran E w punkcie B $(0, y_B)$. Spełniony musi być warunek:

$$y_B \leq h \quad (4.45)$$

gdzie:

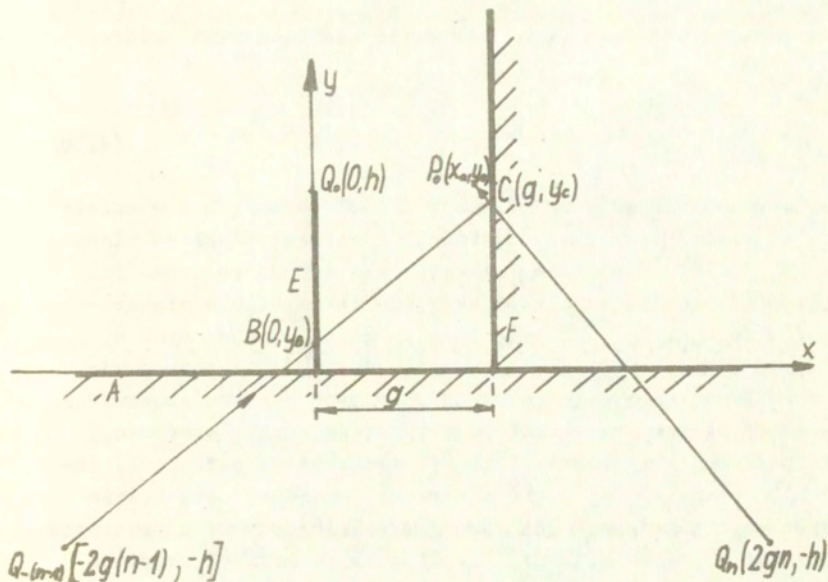
$$y_B = \frac{2g(h+y_0)(n-1)}{2gn-x_0} - h \quad \wedge n \geq 1. \quad (4.46)$$

Po wstawieniu (4.46) do (4.45) otrzymuje się nierówność

$$ng(y_0-h) \leq g(h-y_0) - hx_0 \quad \wedge n \geq 1. \quad (4.47)$$

Podobnie jak dla (4.42) a, b, c rozpatruje się dwa przypadki:

$$d1/ \quad y_0 \leq h \quad (4.48)$$



Rys.4.24. Przypadek gdy źródło pozorne jest poniżej płaszczyzny A, a statnie odbicie nastąpiło od płaszczyzny F.

Nierówności (4.47) i (4.48) spełnione są dla każdego n większego bądź równego jeden.

$$d/2 / y_0 > h \quad (4.49)$$

Z nierówności (4.47) i (4.49) określić można warunki, które spełniać musi n .

$$n \leq \frac{d(h+y_0)-hx_0}{d(y_0-h)} \quad \wedge \quad n \geq 1. \quad (4.50)$$

Określone zostały maksymalne rzędy źródeł pozornych i w zależności od położenia punktu obserwacji i geometrii układu płaszczyzn E, F, A. Jak pokazane w rozdziale 4.3 do obliczeń fali ugiętych używane są pozorne punkty obserwacji P_k , a nie źródła pozorne Q_n i Q_{-n} . Na podstawie zależności uzyskanych w rozdziałach 4.4.2 a, b, c, d i wzorów (4.11a), (4.11b) otrzymuje się określenie maksymalnego rzędu pozornych punktów obserwacji P_k w zależności od wysokości rzeczywistego punktu obserwacji ponad podłożem A i geometrii układu płaszczyzn: podłoża A, fasady F i ekranu E. Gdy punkt obserwacji znajduje się będzie na wysokości mniejszej bądź równej wysokości ekranu h powstanie nieskończona liczba pozornych punktów obserwacji P_k zarówno o numerach parzystych jak i nieparzystych nad i poniżej płaszczyzny A.

Dla punktów obserwacji znajdujących się na wysokości większej niż wysokość ekranu h , powstanie jeden pozorny punkt obserwacji pierwszego rzędu obrazujący odbicie od fasady F powyżej płaszczyzny A, oraz skończona liczba pozornych parzystych i nieparzystych punktów obserwacji poniżej płaszczyzny A obrazujących odbicia fali ugiętej między płaszczyznami E i F oraz jedno odbicie od płaszczyzny A.

Maksymalny rząd k pozornego parzystego punktu obserwacji określa się wstawiając (4.11a) do (4.44)

$$k \leq \frac{2hx_0}{d(y_0-h)}, \quad (4.51)$$

k - należy do zbioru liczb dodatnich parzystych /0, +2, +4.../

Maksymalny rząd k pozornego nieparzystego punktu obserwacji uzyskuje się wstawiając (4.11b) do (4.50)

$$k \leq \frac{dy_0 + 3hd - 2hx_0}{d(y_0 - h)}, \quad (4.52)$$

k - należy do zbioru liczb dodatnich nieparzystych /1, 3, 5.../

5. BADANIA MODELOWE

Celem pracy jak to wspomniane w rozdziale pierwszym jest opracowanie metody obliczenia rozkładu pola akustycznego w przestrzeni chronionej za pomocą ekranu płaskiego przed hałasem docierającym ze źródła przy obecności dodatkowych powierzchni odbijających - podłoga i fasady. Jest to sytuacja, gdy ekran chroni przed hałasem docierającym od trasy komunikacyjnej budynku ustawione wzdłuż tej trasy.

Dla możliwości weryfikacji opracowywanej metody wykonane badania modelowe. Wyniki uzyskane w badaniach modelowych posłużyły jako układ odniesienia do wyników uzyskanych w obliczeniach komputerowych i posłużyły do opracowywania modelu komputerowego rozważanej sytuacji urbanistycznej: źródło hałasu, ekran akustyczny, podłoga i fasada chronionego budynku.

5.1. Zasady odwzorowania w badaniach modelowych.

Dokładne odwzorowanie układu urbanistycznego w którym część zabudowy ma być chroniona przed hałasem docierającym od trasy komunikacyjnej stanowi podstawową trudność w badaniach modelowych. Modelowanie wymaga uwzględnienia wielu różnych czynników z których jako najważniejsze są:

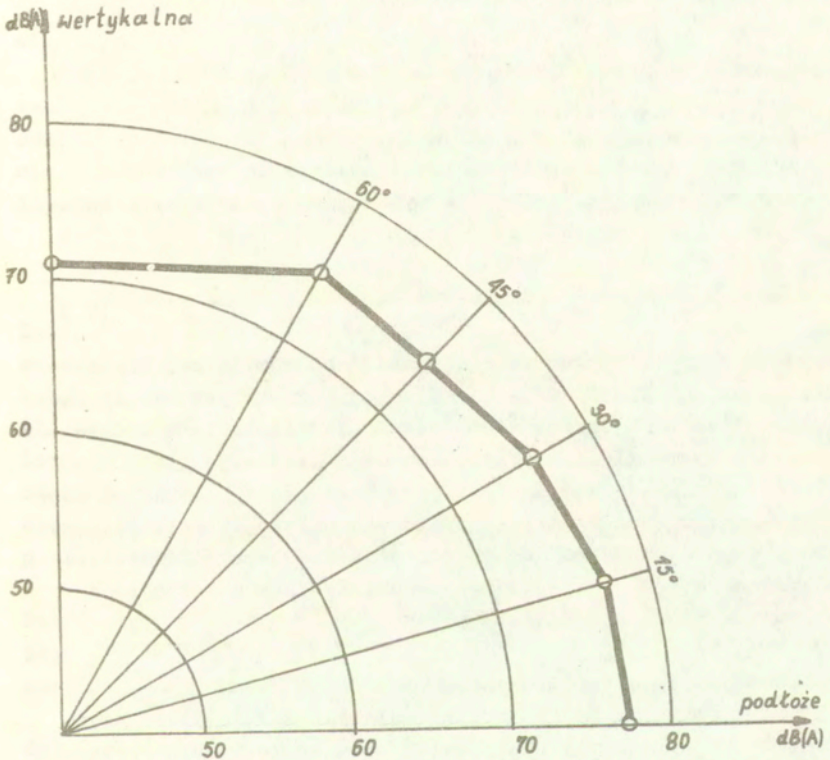
- odwzorowanie warunków ruchu komunikacyjnego na poszczególnych pasach wraz z uwzględnieniem charakterystyk kierunkowości poruszających się pojazdów,
- dokładne odwzorowanie konfiguracji terenu z uwzględnieniem zróżnicowanych warunków podłoga,
- odwzorowanie współczynników odbicia fasady budynku, ekranu oraz otaczającego terenu,
- odwzorowanie warunków atmosferycznych, które wpływają na propagację fal akustycznych.

Źródłem hałasów komunikacyjnych są pojazdy poruszające się po trasie. W zależności od natężenia ruchu trasę reprezentują zastępcze, punktowe źródła hałasu, względnie zastępcze źródła liniowe, gdy natężenie ruchu przekracza 300 poj./h [17]

Zarówno z punktu widzenia badań modelowych jak też i obliczeń teoretycznych istotna jest charakterystyka kierunkowości pojazdu będącego źródłem hałasu. W badaniach hałasów komunikacyjnych [18] stwierdzone, że pojazdy stanowią źródła kierunkowe

o charakterystyce kierunkowości kełowej w zakresie kątów $0 - 45^\circ$ /rys.5.1/, dla większych kątów charakterystyka w dużym stopniu odbiega od charakterystyki kierunkowej źródła fali kulistej, rozbieżność ta dochodzi do około 10 dB(A) dla kąta 90° .

Z uwagi na wymiary komór bezekowych gdzie najczęściej wykonane są badania modelowe, modele odwzorowujące obiekty rzeczywiste wykonuje się zmniejszając je w odpowiedniej skali.



Rys.5.1. Charakterystyka kierunkowości pojazdów osobowych poruszających się z prędkością 60 km/h w odległości $7,62 \text{ m}$ od środka źródła.

Jako skalę S_M przyjmuje się stosunek wymiarów modelu do odpowiednich wymiarów rzeczywistych:

$$S_M = \frac{T_M}{T_{Rz}} \quad (5.1)$$

T_{Rz} - wymiar rzeczywisty,

T_M - odpowiadający mu wymiar w modelu.

Wyniki badań modelowych adekwatne są do wyników badań rzeczywistych gdy spełniony jest warunek:

$$\frac{\omega_M}{C_M} \cdot T_M = \frac{\omega_{Rz}}{C_{Rz}} \cdot T_{Rz} \quad (5.2)$$

ω_M - pulsacja w badaniach modelowych,

C_M - prędkość dźwięku w ośrodku zastosowanym do badań.

W przypadku gdy ośrodki w obu sytuacjach są te same z relacji (5.1) i (5.2) wynika, że:

$$S_M = \frac{\omega_{Rz}}{\omega_M} \quad (5.3)$$

Można tak robić gdy tłumienie ośrodka jest pomijalne. Dla stosunkowo dużych odległości w badaniach rzeczywistych należy uwzględnić tłumienie fali i odwzorować to tłumienie w modelu np. poprzez wypełnianie komory bezdechowej azotem.

Współczynnik odbicia dźwięku jest wielkością zależną od częstotliwości. Odwzorowanie rzeczywistego układu urbanistycznego w modelu jest prawdziwe gdy charakterystyka częstotliwościowa współczynnika odbicia jest odwzorowana zgodnie z relacją odwzorowującą częstotliwości.

5.2. Metodyka badań modelowych.

Z uwagi na trudności w odwzorowaniu jak i dużą ilość czynników, które należałoby uwzględnić przy odwzorowywaniu rzeczywistego układu urbanistycznego w zmniejszonym modelu doświadczalnym, przyjęte szereg uproszczeń.

Przedmiotem badań jest sytuacja rzeczywista kiedy budynek mieszkalny ma być chroniony przed hałasem od trasy komunikacyjnej przez zastosowanie ekranu akustycznego.

W badaniach przyjęto istnienie jednego zlokalizowanego

źródła hałasu /pojazdu/ zakładając, że hałas od trasy komunikacyjnej można traktować jako hałas od szeregu źródeł punktowych umiejscowionych wzdłuż osi trasy komunikacyjnej. W modelu przyjęte promieniowanie małego źródła umieszczonego na twardym podłożu. W pewnej odległości od źródła umieszczono prostopadłe do podłoża twardą powierzchnię odbijającą, odpowiadającą istnieniu fasady budynku. Następnie wprowadzono ekran oddzielający fasadę budynku od źródła hałasu, kolejno określając rozkład poziomego ciśnienia akustycznego w funkcji wysokości nad podłożem, wzdłuż fasady budynku. Ponadto pominięto wpływ tłumienia ośrodka.

Badania przeprowadzono w komorze bezekhowej IPPT PAN o wymiarach 5,4 x 3,3 x 2,9 m. Przyjęto skalę $S = 1:5$. Przyjęcie takiej skali wynikało z konieczności uzyskania kompromisu między rozmiarami komory, a możliwościami aparatury pomiarowej, działającej w zakresie częstotliwości akustycznych /16 - 20000Hz/.

Użyte były dwa źródła:

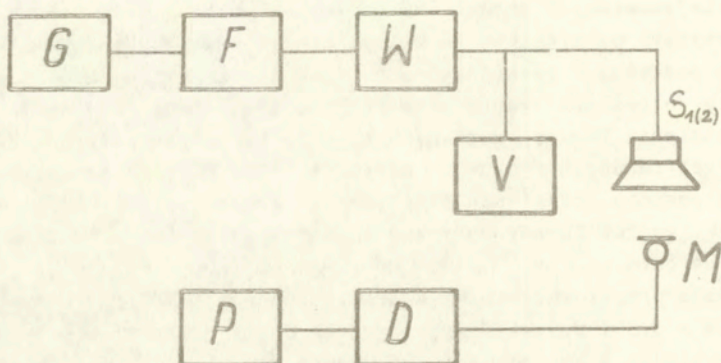
- źródło S_1 dla zakresu częstotliwości 500 - 2000Hz,
- źródło S_2 dla zakresu 4000 - 16000Hz.

Źródło S_1 złożone było z dwóch głośników średniotonowych GD 10/5 skierowanych do siebie membranami, co w przybliżeniu zapewniało kołową charakterystykę źródła w płaszczyźnie prostopadłej do osi głównej głośników z dokładnością ± 1 dB.

Źródło S_2 stanowił jeden głośnik wysokotonowy GD WK 16/40 o charakterystyce kołowej w pobliżu osi głównej, o kącie 45° , z dokładnością ± 1 dB. Źródło S_2 było skierowane osią główną na punkt odpowiadający środkowi krawędzi ekranu.

Odwzorowanie powierzchni odbijających: fasady budynku, podłoża, powierzchni ekranu, realizowano przez użycie w modelu płyt wiórowych, płyt laminowanych i desek. Powierzchnie pochłaniające odwzorowywano przez wyłożenie powierzchni gąbką.

Użyty w badaniach modelowy układ pomiarowy /rys.5.2/ składał się z dwóch części: nadawczej i odbiorczej. Część nadawczą układu stanowił generator B&K, układ filtrów oktaowych, woltomierz oraz stosowane wymiennie źródła S_1 i S_2 . Część odbiorczą układu stanowił mikrofon B&K 1/2", miernik poziomu dźwięku B&K 2109, pisak PSG 101 używany do ciągłego zapisu poziomu ciśnienia akustycznego wynikających ze zmian wysokości nad podłożem.



Rys.5.2. Schemat układu pomiarowego, wykorzystywanego w badaniach modelowych: G - generator, F - układ filtrów, W - wzmacniacz, V - woltomierz, $S_{1/2}$ - głośnik, M - mikrofon, D - miernik poziomu dźwięku, P - pisak.

W modelu ekran przegradzał komorę bezechową. Głośnik i mikrofon zawsze były położone centralnie w stosunku do ekranu. Fasadę budynku w modelu odwzorowywała zabudowa z płyt wiórowych jednej ze ścian komory, równoległej do ekranu, sięgająca do wysokości 2,2 m.

Źródła we wszystkich przypadkach znajdowały się w odległości 1 m od ekranu /lub miejsca położenia ekranu/. Położenie środka źródła nad pedżem, dla obu źródeł S_1 i S_2 , określone jako równe 0,15 m.

Badania były prowadzone dla odległości ekranu od fasady zmieniającej się w zakresie od 1 m do 3 m, odległość tę zwiększano kolejne o 0,5 m. Mikrofon poruszał się wzdłuż linii prostopadłej do pedżu /rys.5.3/ w odległości 0,2 m od miejsca położenia fasady.

Zbadane dwa ekrany:

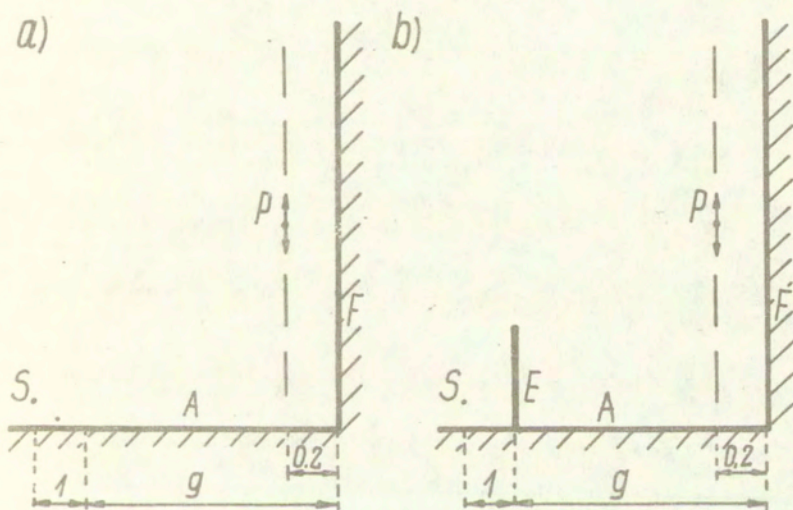
- dwustronnie odbijający,
- jednostronnie pochłaniający od strony fasady /druga strona odbijająca/.

Wykonane pomiary poziomu ciśnienia akustycznego dla sygnału szumowego o szerokości oktawowej i częstotliwościach środkowych 0,5, 1, 2, 4, 8, 16 kHz, dla sytuacji:

- bez ekranu: poziom ciśnienia akustycznego L_0 ,
- z ekranem: poziom ciśnienia akustycznego L_1 .

Na ich podstawie określane efektywność ekranowania:

$$IL = L_0 - L_1 \quad (5.4)$$



Rys.5.3. Sytuacje pomiarowe przedstawione schematycznie:

- S - źródło, A - podłoże, E - ekran, F - fasada, P - punkt pomiarowy, g - odległość ekranu od fasady,
- a/ podłoże i fasada budynku,
- b/ podłoże , fasada budynku i ekran.

Z uwagi na to, że efektywność ekranowania jest wartością określoną jako różnica z dwóch pomiarów /bez i z ekranem/, a dokładności pomiarów decyduje stabilność teru pomiarowego w czasie, a nie dokładność poszczególnych pomiarów, oraz odstęp sygnału użytecznego od poziomu tła /szumów/. W celu uzyskania wymaganego odstępu od poziomu tła, pomiary przeprowadzone były w kamerze bezekhowej IPPT PAN nocami oraz w niedzielę. Odstęp poziomu najsłabszego sygnału użytecznego od poziomu tła był większy od 6 dB. W celu utrzymania stabilności teru pomiarowego w funkcji czasu był on sprawdzany i kalibrowany przed i w trakcie każdej serii pomiarowej. Nierównomierności teru pomiarowego w funkcji czasu były mniejsze od 0,2 dB.

6. OBLICZENIA NUMERYCZNE

6.1. Ten o częstotliwości równej środkowi pasma oktawowego i współczynnikach odbicia równych jedności

Przy tworzeniu modelu komputerowego wykorzystuje się $(3 \cdot 10)$ oraz zależności z rozdziału 4. Obliczenia zostały wykonane dla sytuacji pomiarowych z rozdziału 5 /badania modelowe/ za pomocą minikomputera ZX spectrum.

W pierwszym przybliżeniu współczynniki odbicia wszystkich, będących w modelu, powierzchni /ekran, fasada, podłoga/ przyjęto równe jedności. Obliczenia prowadzone dla dyskretnych częstotliwości będących częstotliwościami środkowymi pasm oktawowych. Program został tak skonstruowany, że wynikiem była efektywność ekranowania IL. Wyniki dwóch przykładowych sytuacji : $g = 1,5$ $f = 0,5$ kHz ; $g = 1,5$ $f = 16$ kHz /rys.5.3a, 5.3b/ przedstawione na wykresach razem z wynikami badań modelowych /rys.6.1a i 6.1b/.

Na osi pionowej zaznaczona jest wysokość punktu obserwacji nad podłogą. Obliczenia zostały przeprowadzone dla wysokości punktu obserwacji nad podłogą w granicach /0,1 - 2,2 m/ ze skokiem 0,05 m. Na osi poziomej zaznaczona efektywność ekranowania w dB.

Efektywność ekranowania jest wielkością względną, określoną jako różnica poziomów ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji bez ekranu i z ekranem, co dla potencjału akustycznego oznacza, że:

$$IL = 20 \lg \frac{|\phi_1|}{|\phi|} \quad (6.1)$$

ϕ_0 - amplituda potencjału akustycznego w punkcie obserwacji przed zainstalowaniem ekranu

ϕ - amplituda potencjału akustycznego w punkcie obserwacji po zainstalowaniu ekranu.

Przeprowadzone zostały obliczenia dla trzydziestu sytuacji: $d = 1, 1,5, 2, 2,5, 3$ [m] ; $f = 0,5, 1, 2, 4, 8, 16$ [kHz]; źródło, podłoga, ekran, fasada, punkt obserwacji /rozdział 5/. Na rys.6.1 przedstawione tylko dwa przykładowe wykresy porównawcze.

Poniżej przedstawiono tabelę częstotliwości i odpowiadającą jej długość fali.

f [kHz]	0,5	1	2	4	8	16
λ [m]	0,69	0,34	0,17	0,09	0,04	0,02

Tab.6.1. Częstotliwości środkowe októw i odpowiadające im długości fal.

Wysokość ekranu w modelu /rozdział 5/ wyniosła 0,4 m. Można uważać, że założenie teorii Rubinowicza o stosunkach wymiarów liniowych do długości fal spełnione są dla częstotliwości większych od 8 kHz co z uwagi na skalę 1:5 odpowiada częstotliwością większym od 1,6 kHz.

Z otrzymanych na podstawie obliczeń i pomiarów wykresów wynika, że dla częstotliwości 8 i 16 kHz efektywność zmierzona ma charakter zbliżony do wartości średniej efektywności obliczonej numerycznie dla tonów odpowiadających częstotliwościom środkowym pasm oktaowych. Sugerowałoby to, że należy dokonać obliczeń efektywności ekranowania dla pasm o szerokości oktaowej, a nie dla tonu będącego częstotliwością środkową pasma oktaowego. Poniżej przedstawiono częstotliwości środkowe f_o pasm oktaowych i częstotliwości skrajne f_p i f_k dla tych pasm.

f_o [kHz]	0,5	1	2	4	8	16
f_p [kHz]	0,354	0,707	1,414	2,828	5,659	11,314
f_k [kHz]	0,707	1,414	2,828	5,659	11,314	22,628

Tab.6.2. Częstotliwości środkowe i skrajne pasm oktaowych.

Jak wynika z tabeli 6.2 częstotliwość początkowa pasma oktaowego o częstotliwości środkowej 8 kHz wynosi około 5,7 kHz. Z uwagi na spełnienie warunku Rubinowicza o stosunku wymiarów liniowych modelu do długości fali w dalszych obliczeniach ograniczone się do oktaw o częstotliwości środkowej 16 kHz.

6.2. Pasmo oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz i współczynnikach odbicia równych jedności.

Analizator użyty w pomiarach /rozd.5/ mierzy wartości skuteczne poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach oktawowych, wartość skuteczna w pasmach f_1 , f_2 funkcji f określone jest na podstawie zależności:

$$\phi_{Sk} = \sqrt{\frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} |\phi(f)|^2 df} \quad (6.2)$$

Wartość ϕ_{Sk} ze wzoru (6.2) oblicza się w sposób numeryczny zgodnie z zależnością:

$$\begin{aligned} \phi_{Sk} &\approx \sqrt{\frac{1}{f_2 - f_1} \sum_{k=1}^N |\phi(f_k)|^2 \frac{f_k - f_1}{N}} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\phi(f_k)|^2} \end{aligned} \quad (6.3)$$

N - liczba podprzedziałów na które zostało podzielone pasmo o szerokości $\langle f_1, f_2 \rangle$,

f_k - częstotliwość środkowa k -tego podprzedziału,

$$f_k = \frac{2Nf_1 + (f_2 - f_1)(2k - 1)}{2N} \quad (6.4)$$

Korzystając ze wzorów (6.3) i (6.4) oraz rozdz.5.1 obliczone zostały efektywności ekranowania w paśmie oktawowym o częstotliwości środkowej 16 kHz dla sytuacji źródło, ekran, podłoga, fasada punkt obserwacji. W obliczeniach wszystkie współczynniki odbicia przyjęto równe jedności. Wyniki dla przypadków $g = 1; 1,5; 2; 2,5; 3$; i pasma oktawowego o częstotliwości środkowej 16 kHz przedstawione na wykresach /Rys.6.2 - 6.6/ wspólnie z efektywnością uzyskaną na podstawie badań medelowych dla ekranu obustronnie odbijającego /współczynniki odbicia w obliczeniach równe jedności/. Efektywność ekranowania obliczona numerycznie jest o kilkanaście dB większa od zmierzonej w badaniach medelowych. Wykazuje podobny rozkład jakościowy /minima i maksima/.

Z uwagi na to, że w obliczeniach przyjęto wszystkie współczynniki

niki odbicia równe jedności należy spodziewać się, że użycie w obliczeniach współczynników odbicia uzyskanych pomiarem pozwoli zmniejszyć różnicę między efektywnością ekranowania uzyskaną w sposób obliczeniowy, a efektywnością uzyskaną z badań modelowych.

Poniżej przedstawiono tabelę współczynników odbicia materiałów użytych w modelu.

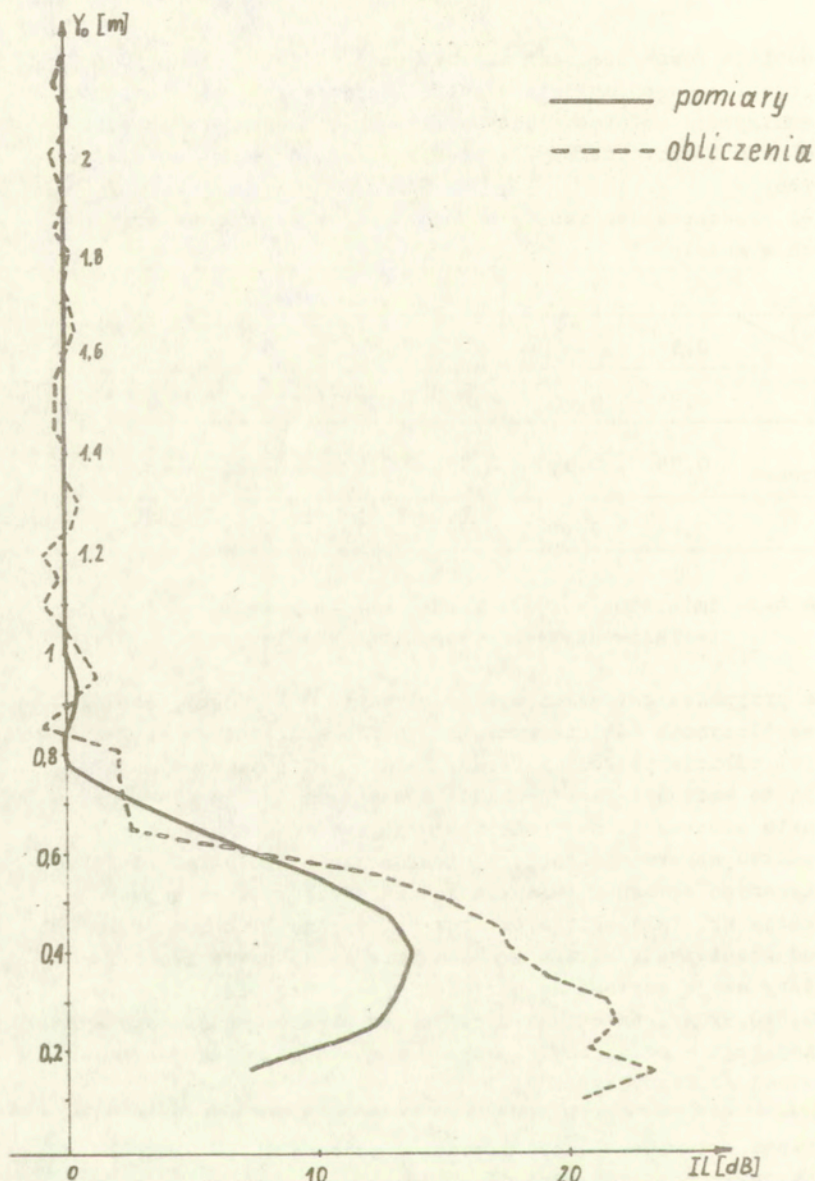
f [kHz] / b	0,5	1	2	4	8	16
deska	0,94	0,88	0,9	0,83	0,81	0,8
płyta laminowana	0,95	0,94	0,95	0,92	0,92	0,9
gąbka	0,66	0,71	0,33	0,18	0,08	0,04

Tabela 6.3. Zmierzone w rurze Kundta współczynniki odbicia materiałów użytych w badaniach modelowych.

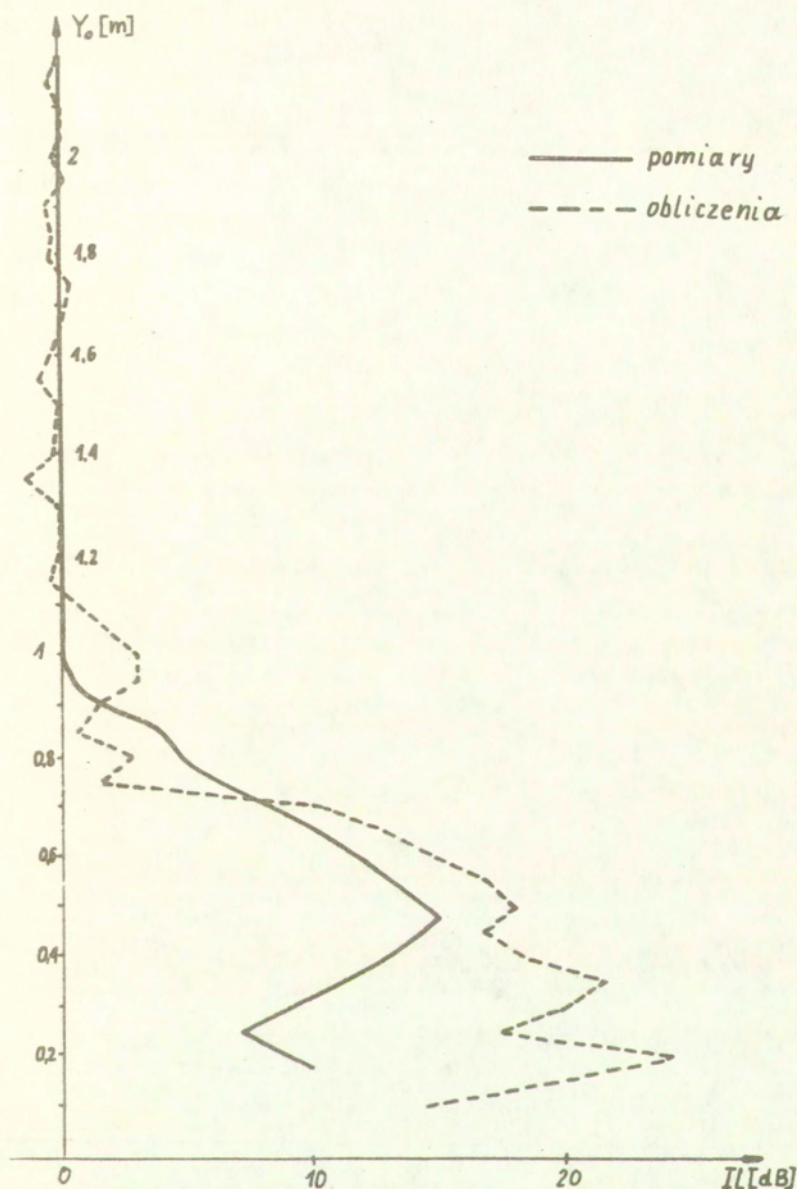
Dla przypadku gdy ekran był dwustronnie odbijający /deska/ jego współczynnik odbicia wynosił 0,8 /16 kHz/, natomiast współczynniki odbicia podłoża i fasady /płyta laminowana/ wynosiły 0,9. Są to wartości duże jednakże z uwagi na to, że dla wysokości punktu obserwacji nad podłożem mniejszej niż wysokość ekranu h do punktu obserwacji dociera nieskończenie wiele fal odbitych od płaszczyzn ekranu i fasady mogą zmniejszyć poziom w punkcie obserwacji np. fala ugięta na krawędzi ekranu i odbita dwukrotnie od płaszczyzny ekranu oraz dwukrotnie od powierzchni fasady zmniejszy swoją wartość do wartości 0,5184 wartości pierwotnej /0,8x0,8x0,9x0,9/, natomiast w przypadku ekranu jednostronnie pochłaniającego - od strony fasady do wartości 0,001296 wartości pierwotnej /0,04x0,04x0,9x0,9/.

6.3. Pasmo oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, współczynniki odbicia różne od jedności.

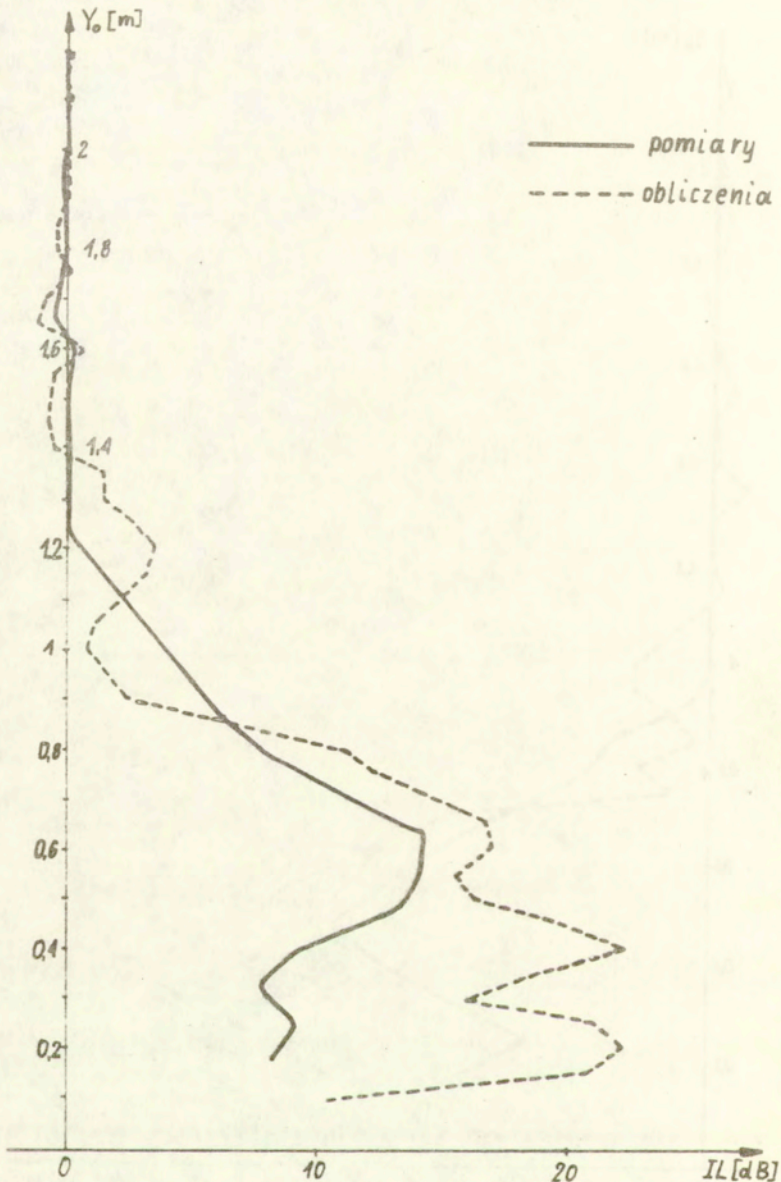
Zarówno fale ugięte jak i geometryczne /w obszarach gdzie one docierają do punktu obserwacji/ ulegają odbiciom od płaszczyzn: podłoża, fasady i ekranu.



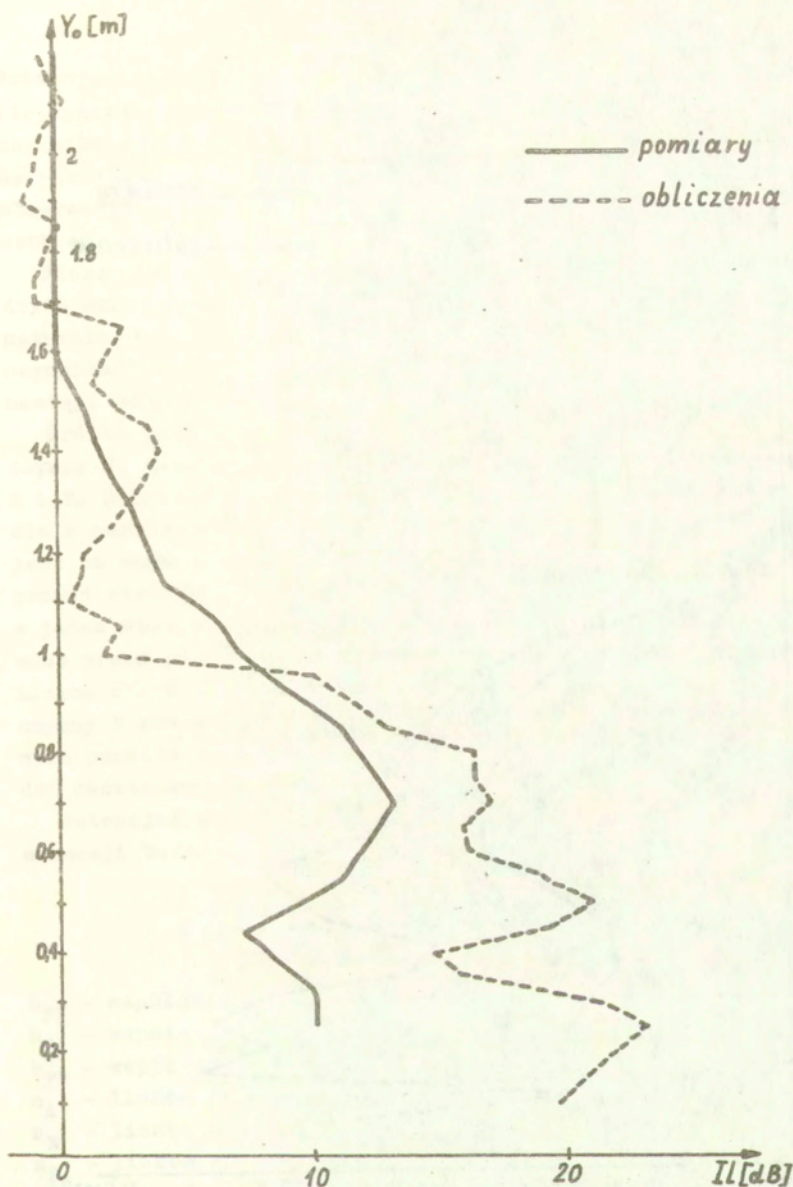
Rys. 6.2 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_0 punktu obserwacji nad podłożem. Pomiarzy - ekran obustronnie odbijający. Obliczenia - współczynniki odbicia ekranu, podłoża i fasady równe 1. Pasmo ośmiodźwiękowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=1$ m



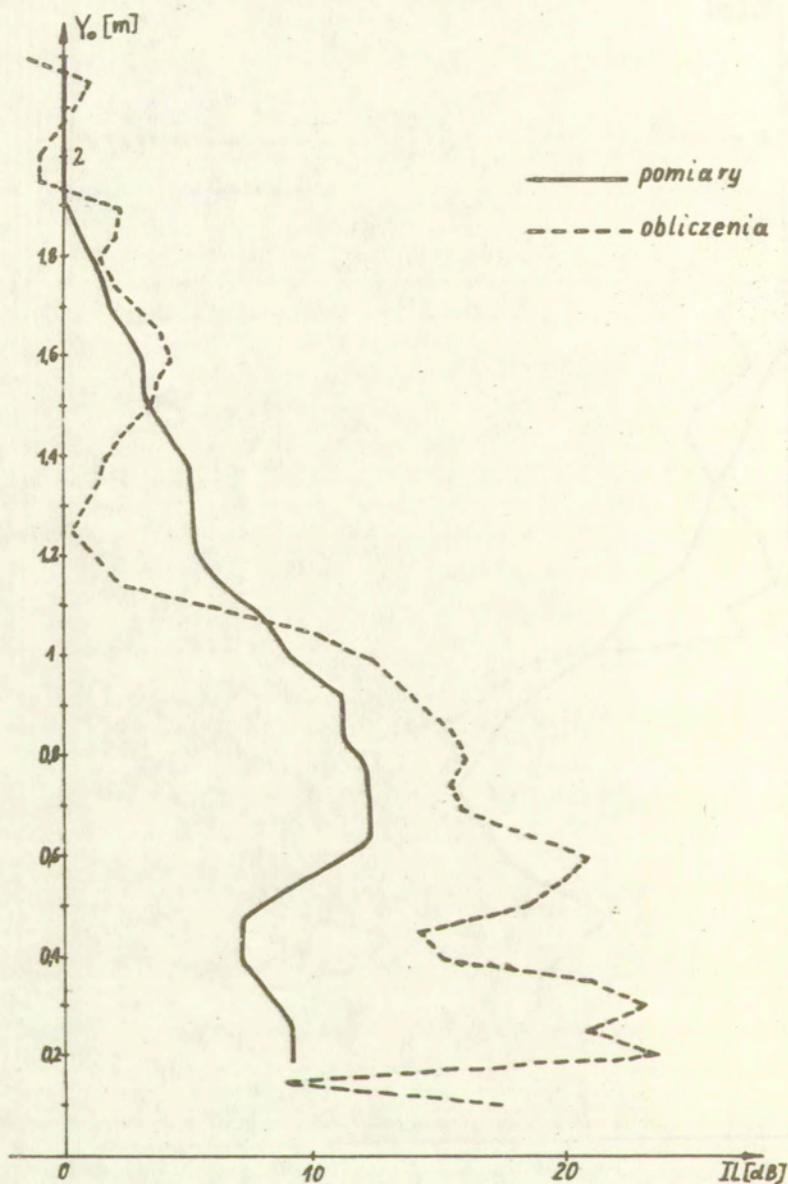
Rys. 6.3 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem. Pomiary - ekran obustronnie odbijający. Obliczenia - współczynniki odbicia ekranu, podłoża i fasady równe 1. Pasma oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=1.5$ m.



Rys. 6.4 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem. Pomiarzy - ekran obustronnie odbijający. Obliczenia - współczynniki odbicia ekranu, podłoża i fasady równe 1. Pasma oktawowo o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=2$ m.



Rys. 6.5 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem. Pomiary - ekran obustronnie odbijający. Obliczenia - współczynniki odbicia ekranu, podłoża i fasady równe 1. Pasmo oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=2.5$ m.



Rys. 6.6 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem. Pomiary - ekran obustronnie odbijający. Obliczenia - współczynniki odbicia ekranu, podłoża i fasady równe 1. Pasmo ośmiooktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=3$ m.

Potencjał fali dyfrakcyjnej po odbiciu od płaszczyzny równy jest iloczynowi potencjału fali docierającej do płaszczyzny i współczynnika odbicia tej płaszczyzny. Aby określić potencjał fali dyfrakcyjnej po odbiciach od płaszczyzn ograniczających punkt obserwacji należy powiązać rząd pozornego punktu obserwacji z liczbą odbić od tych płaszczyzn.

Biorąc do obliczeń pozorne punkty obserwacji P_k o współrzędnych określonych wyrażeniem (4.8), dla $k \in \mathbb{N} / \mathbb{N}$ - zbiór liczb naturalnych/, w przypadku płaszczyzn odbijających E, A, F o współczynnikach odbicia różnych od jedności należy wiedzieć ile razy nastąpi odbicie od każdej płaszczyzny.

Źródła pozorne Q_n , przy $n \leq 0$ położone z lewej strony płaszczyzny E, powstają na skutek tej samej liczby odbić od płaszczyzn E i F. Reprezentowane są one przez pozorne punkty obserwacji P_k dla k parzystych (4.11 a). Liczba odbić od płaszczyzn E i F jest ta sama i równa $k/2$. Dla źródeł pozornych położonych po prawej stronie płaszczyzny F liczba odbić od płaszczyzny F jest o jeden większa niż od płaszczyzny E. Źródła te są reprezentowane przez pozorne punkty obserwacji P_k dla k nieparzystych. Liczba odbić od płaszczyzny E równa jest $(k-1)/2$, a od płaszczyzny F równa $(k+1)/2$. Ponadto dla źródeł pozornych /pozornych punktów obserwacji/ położonych poniżej płaszczyzny A zachodzi dodatkowo jedno odbicie od płaszczyzny A.

Potencjał akustyczny fali dyfrakcyjnej w pozornym punkcie obserwacji będzie wynosił:

$$\phi^d(P_k) = (b_{PE})^{n_E} \cdot (b_{PF})^{n_F} \cdot (b_{PA})^{n_A} \cdot \phi^d(S, Q_0, P_k), \quad (6.5)$$

b_{PE} - współczynnik odbicia ekranu,

b_{PA} - współczynnik odbicia podłoża,

b_{PF} - współczynnik odbicia fasady,

n_A - liczba odbić od podłoża,

n_E - liczba odbić od płaszczyzny ekranu,

n_F - liczba odbić od fasady,

$\phi^d(S, Q_0, P_k)$ - potencjał akustyczny w pozornym punkcie obserwacji P_k , określony zgodnie z (3.10).

Poniżej zostaną określone liczby odbić od kolejnych płaszczyzn odpowiednich pozornych punktów obserwacji.

Gdy pozorny punkt obserwacji znajduje się powyżej płaszczyzny A możliwe są dwa przypadki:

- pierwszy gdy k jest parzyste, wtedy:

$$n_A = 0, \quad n_E = \frac{k}{2}, \quad n_F = \frac{k}{2}, \quad (6.6)$$

- drugi gdy k jest nieparzyste, wtedy:

$$n_A = 0, \quad n_E = \frac{k-1}{2}, \quad n_F = \frac{k+1}{2}. \quad (6.7)$$

Gdy pozorny punkt obserwacji P_k znajduje się poniżej płaszczyzny A również możliwe są dwa przypadki:

- dla k parzystych:

$$n_A = 1, \quad n_E = \frac{k}{2}, \quad n_F = \frac{k}{2}, \quad (6.8)$$

- dla k nieparzystych:

$$n_A = 1, \quad n_E = \frac{k-1}{2}, \quad n_F = \frac{k+1}{2}. \quad (6.9)$$

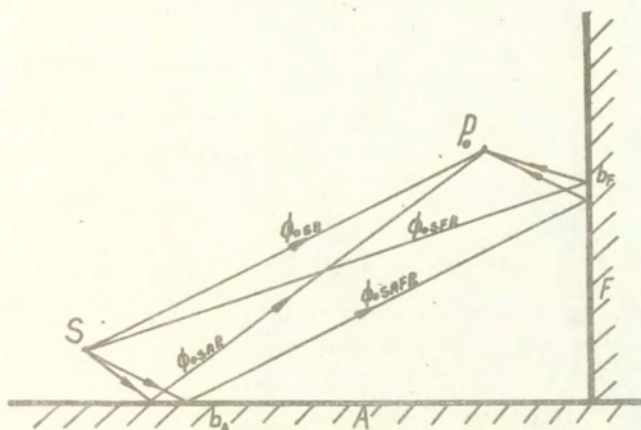
Potencjały fal geometrycznych docierających do punktu obserwacji wraz z falami ugiętymi określa się na podstawie przynależności punktu obserwacji do odpowiednich obszarów /rezdz.4.4/, natomiast potencjały fal geometrycznych docierających do punktu obserwacji przy braku ekranu /rys.6.7/ określa się mnożąc potencjały fal geometrycznych wynikające z odpowiednich odległości przez współczynniki odbicia płaszczyzn od których nastąpiły te odbicia.

$$\phi_g(r, b_A, b_F) = \phi_g(r) \cdot b_A^{n_A} \cdot b_F^{n_F}, \quad (6.10)$$

$\phi_g(r, b_A, b_F)$ - potencjał fali geometrycznej w punkcie obserwacji wynikający z drogi jaką przebyła fala ze źródła S do punktu P_0 /rys.6.7/ i odbić od płaszczyzn podłoża i fasady.

$\phi_g(r)$ - potencjał fali geometrycznej wynikający z drogi jaką przebyła ona ze źródła S do punktu P_0 /rys.6.7/.

n_A, n_F - liczba odbić od płaszczyzn fasady F i podłoża A / $n_F = 0$ lub $n_F = 1$; $n_A = 0$ lub $n_A = 1$ / /rys.6.7/



Rys.6.7. Pole geometryczne docierające do punktu obserwacji gdy istnieją dwie płaszczyzny odbijające pedłoże A i fasada F.

b_A , b_F - współczynniki odbicia pedłoża i fasady.
Korzystając ze wzorów (6.5), (6.6), (6.7), (6.8), (6.9), (6.10) oraz z rozdz.6.2.2 obliczone zostały efektywności ekranowania dla sytuacji z rozdz.4.

a/ ekran odbijający: $b_E = 0,8$; $b_A = 0,9$; $b_F = 0,9$

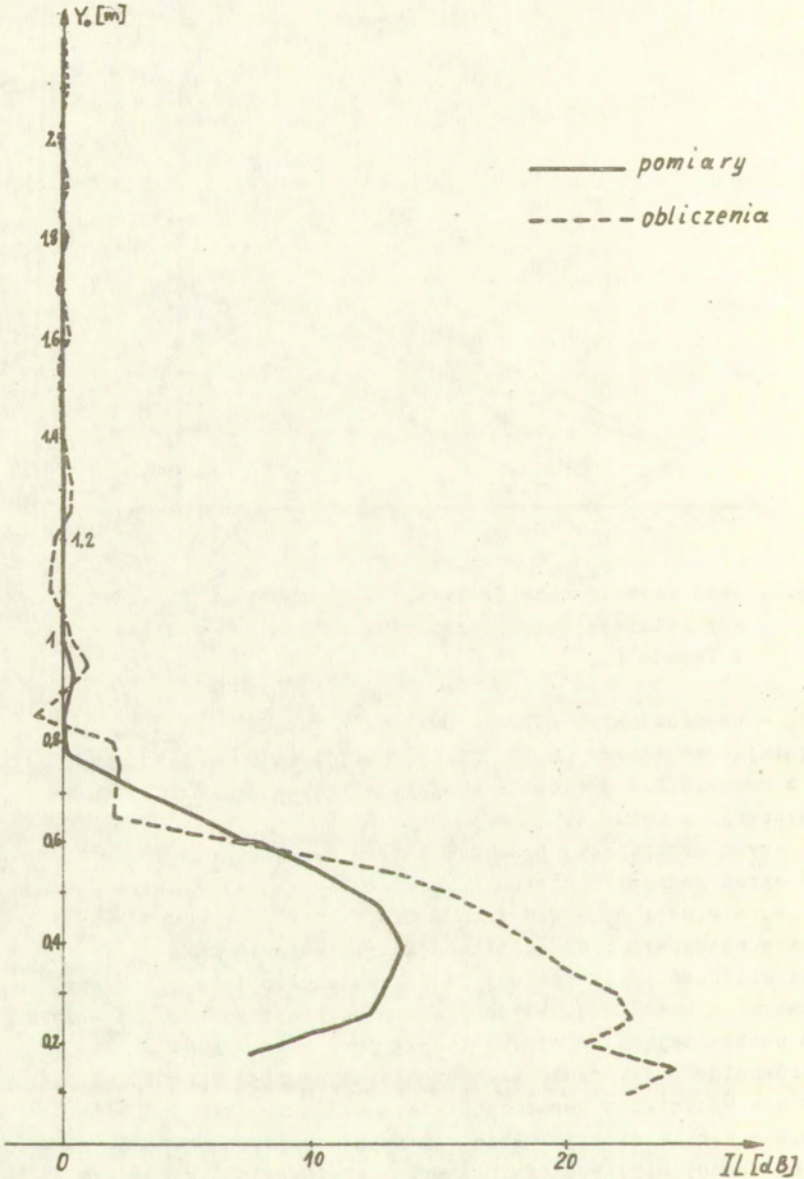
b/ ekran jednostronnie pochłaniający od strony fasady:

$b_E = 0,04$; $b_A = 0,9$; $b_F = 0,9$,

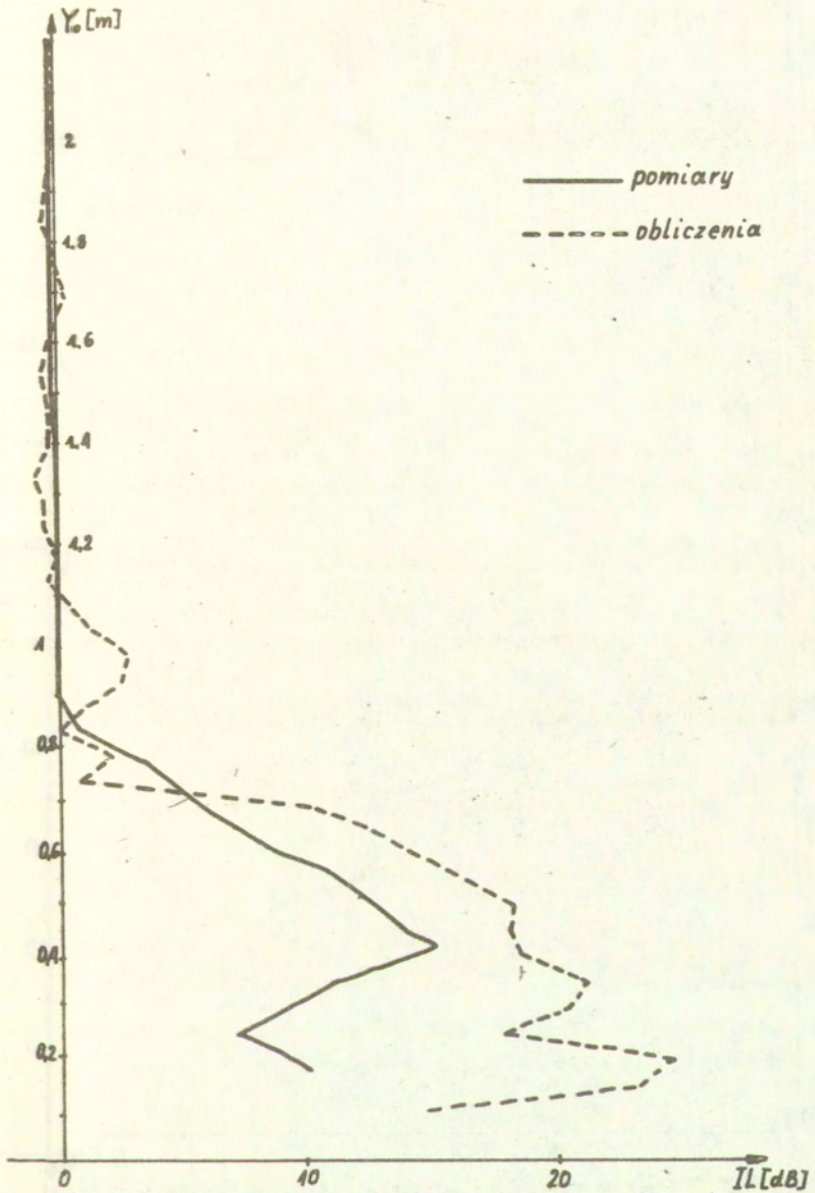
w paśmie oktawowym o częstotliwości środkowej 16 kHz.

Wyniki obliczeń przedstawione na wykresach wspólnie z wynikami uzyskanymi z badań modelowych : ekran odbijający /rys.6.8 - 8.12/, ekran pochłaniający od strony fasady /rys.6.13 - 6.17/.

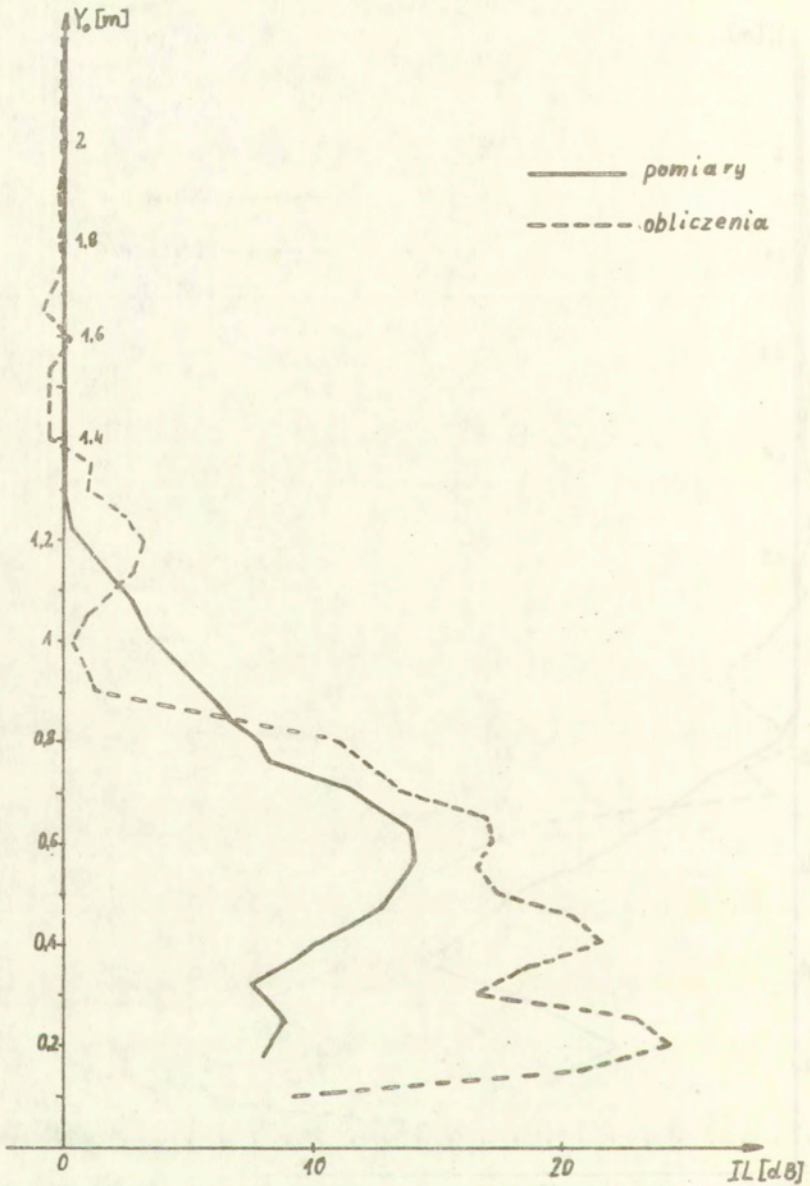
Porównując efektywność ekranowania uzyskaną w sposób obliczeniowy dla wszystkich współczynników odbicia równych jedności rys.6.2 - 6.6, z efektywnością dla współczynników odbicia: ekranu 0,8, fasady 0,9, pedłoża 0,9 można stwierdzić, że wzrosła ona o ok. 1 - 2 dB dla punktu obserwacji położonego poniżej granicy cienia geometrycznego - zwiększyła się więc chociaż nieznacznie różnica pomiędzy efektywnością uzyskaną w sposób oblicze-



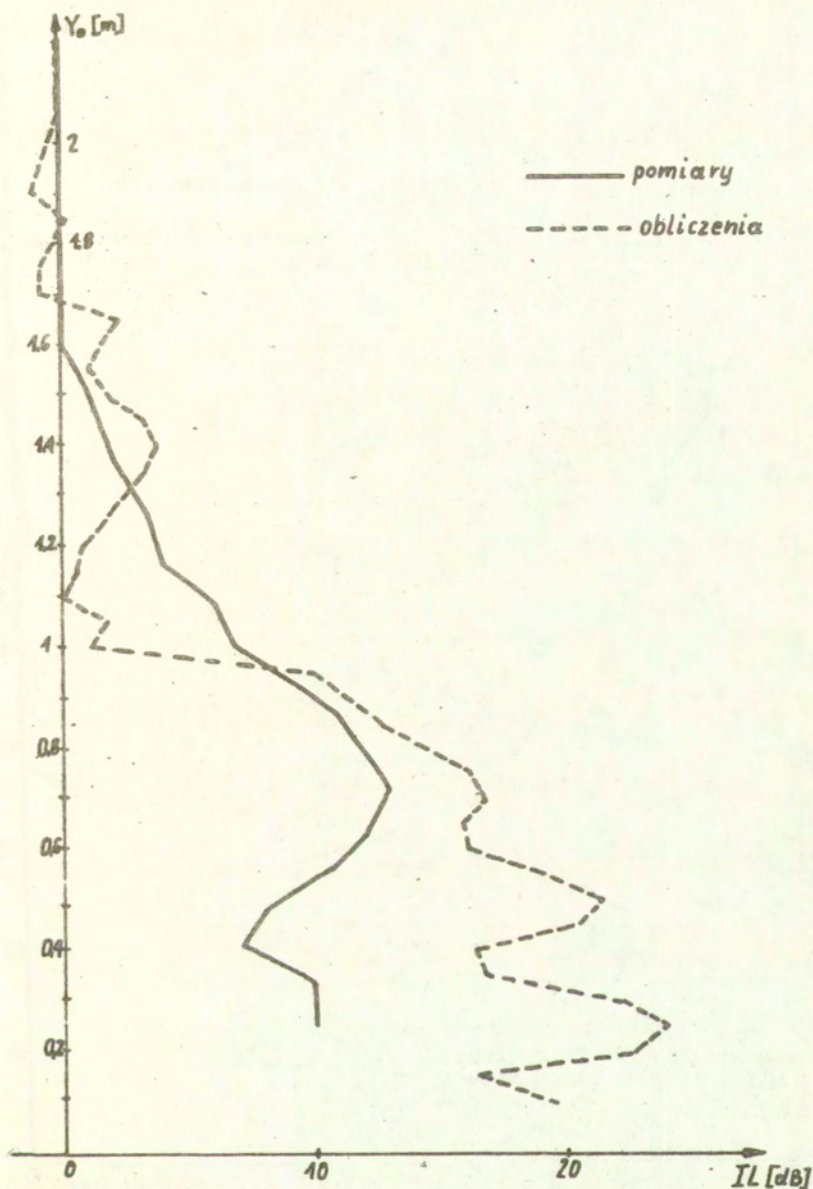
Rys. 6.8 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem, dla ekranu jednostronnie pochłaniającego, pasmo oktańowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=1$ m.



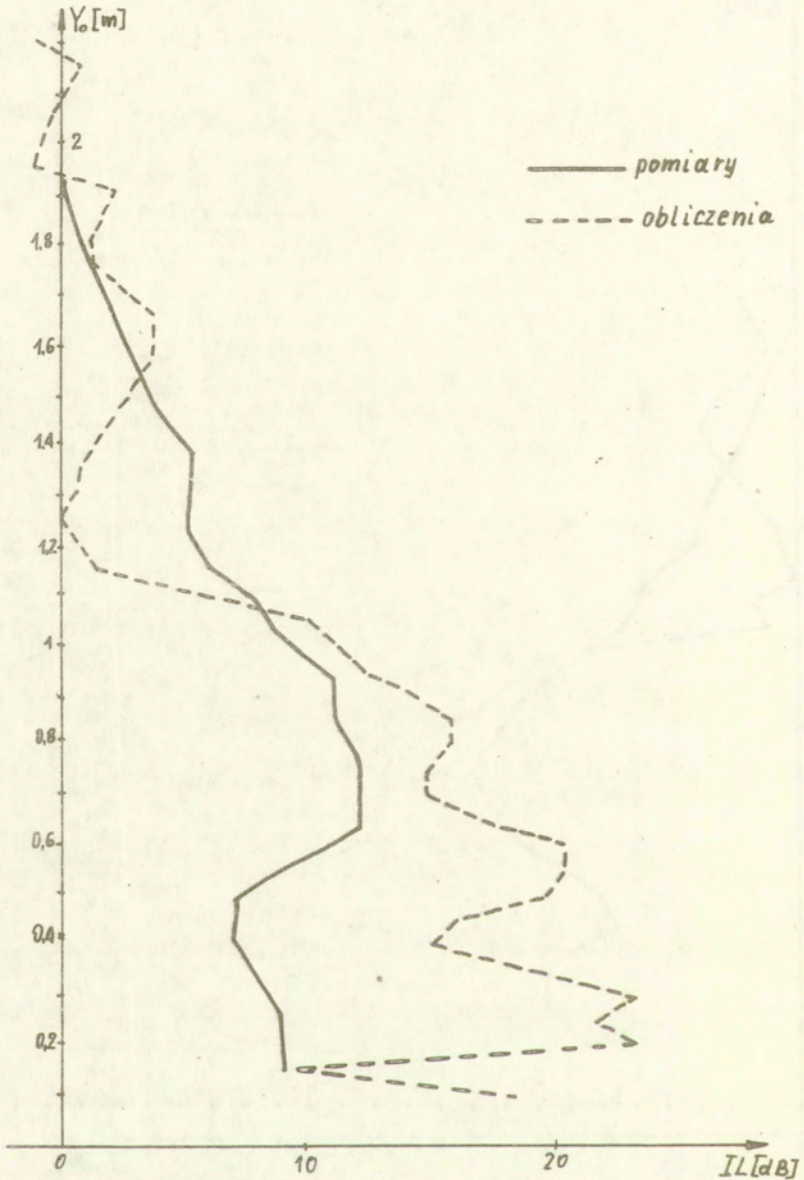
Rys. 6.9 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem, dla ekranu jednostronnie pochłaniającego, pasmo oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=1.5$ m.



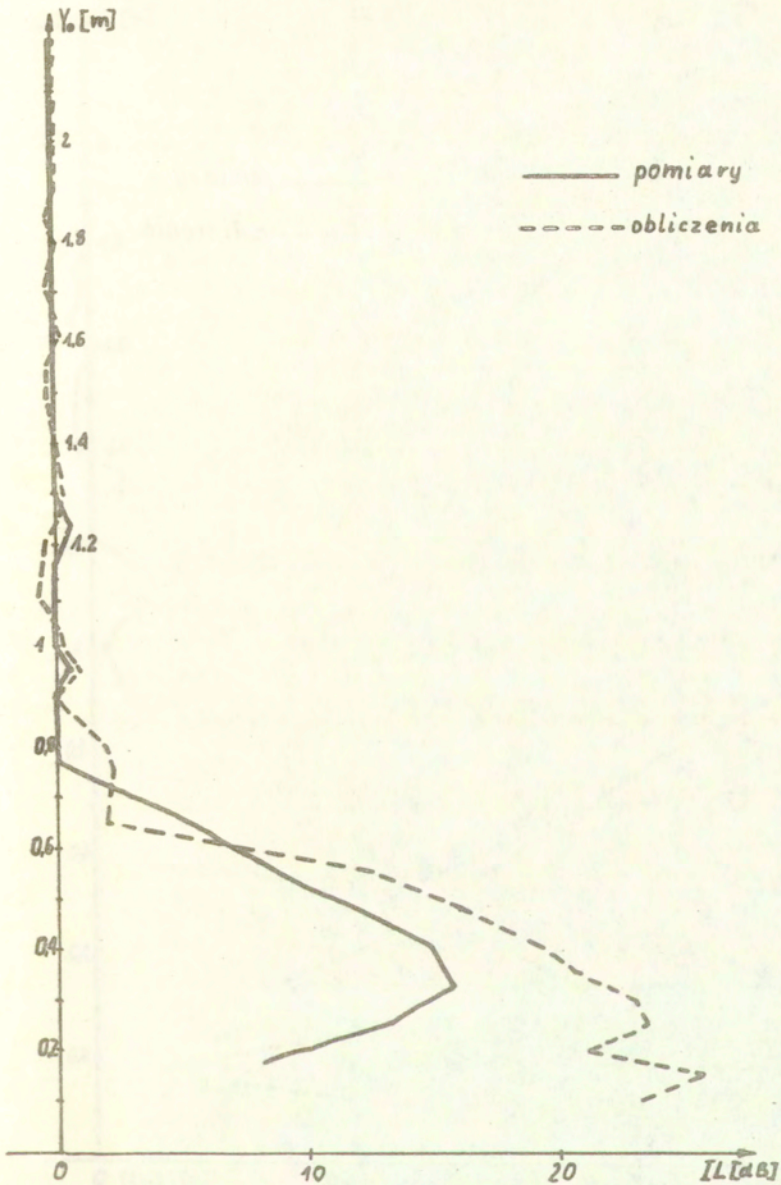
Rys. 8.10 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem, dla ekranu jednostronnie pochłaniającego, pasmo oktańowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=2$ m.



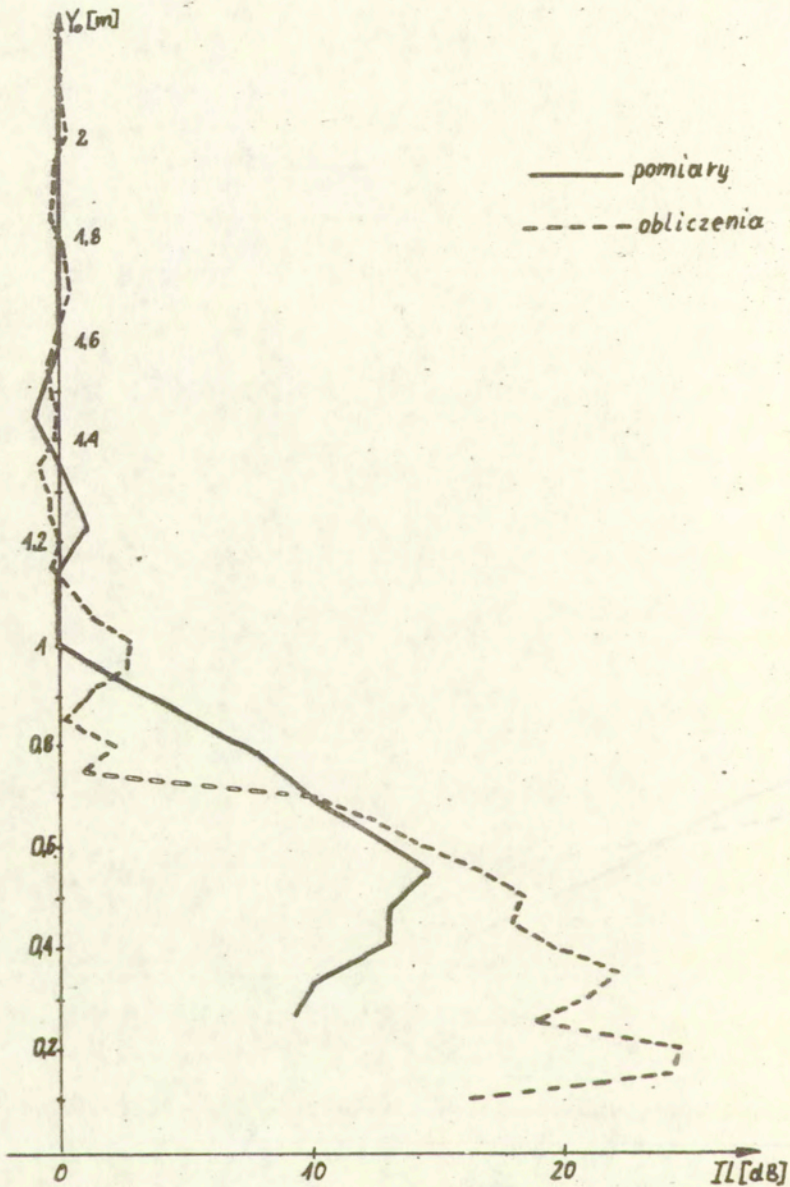
Rys. 6.11 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem, dla ekranu jednostronnie pochłaniającego, pasmo ośmiodźwiękowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=2.5$ m.



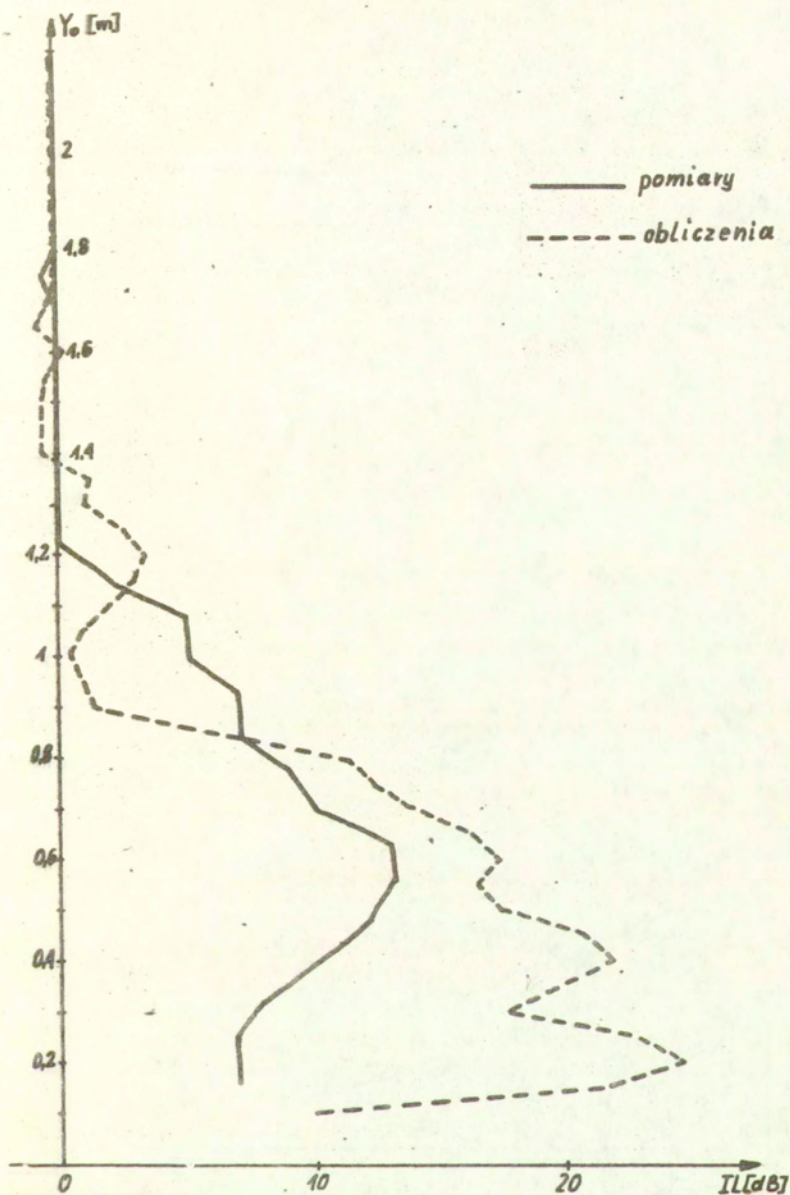
Rys. 6.12 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem, dla ekranu jednostronnie pochłaniającego, pasmo oktafowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=3$ m.



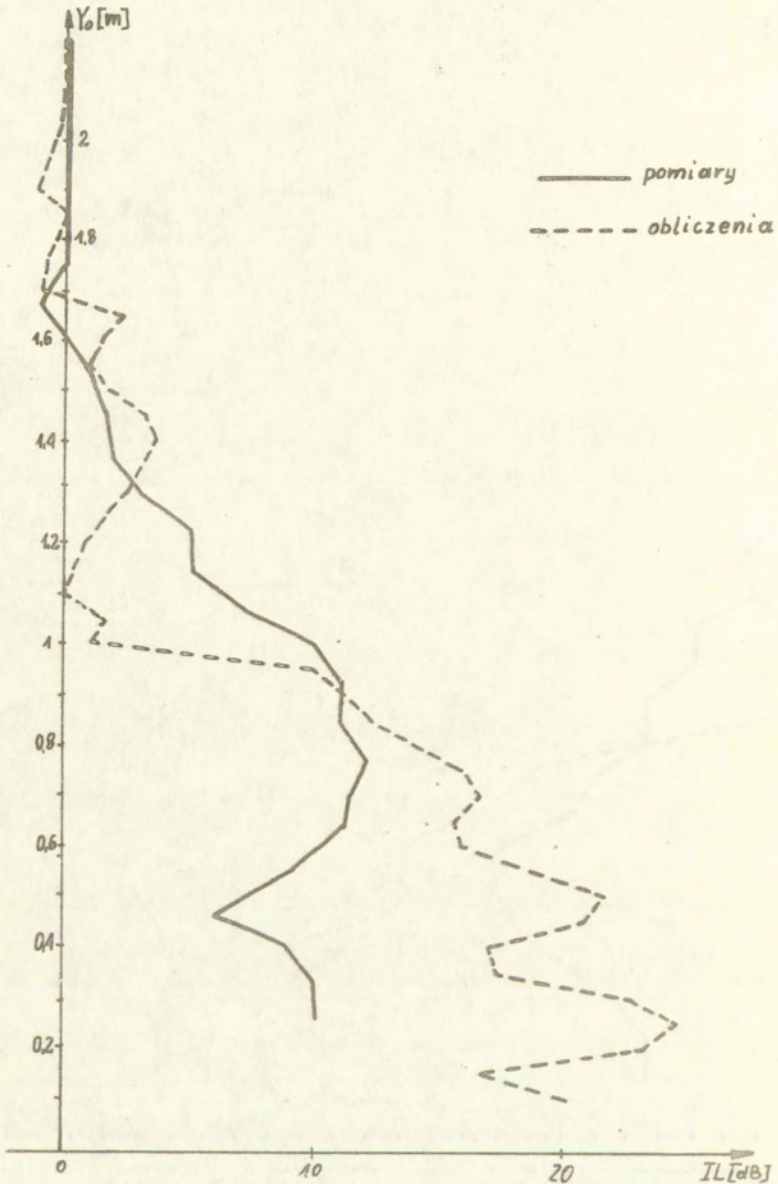
Rys. 6.13 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_0 punktu obserwacji nad podłożem, dla ekranu jednostronnie pochłaniającego, pasmo oktańowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od powierzchni fasady $g=1$ m.



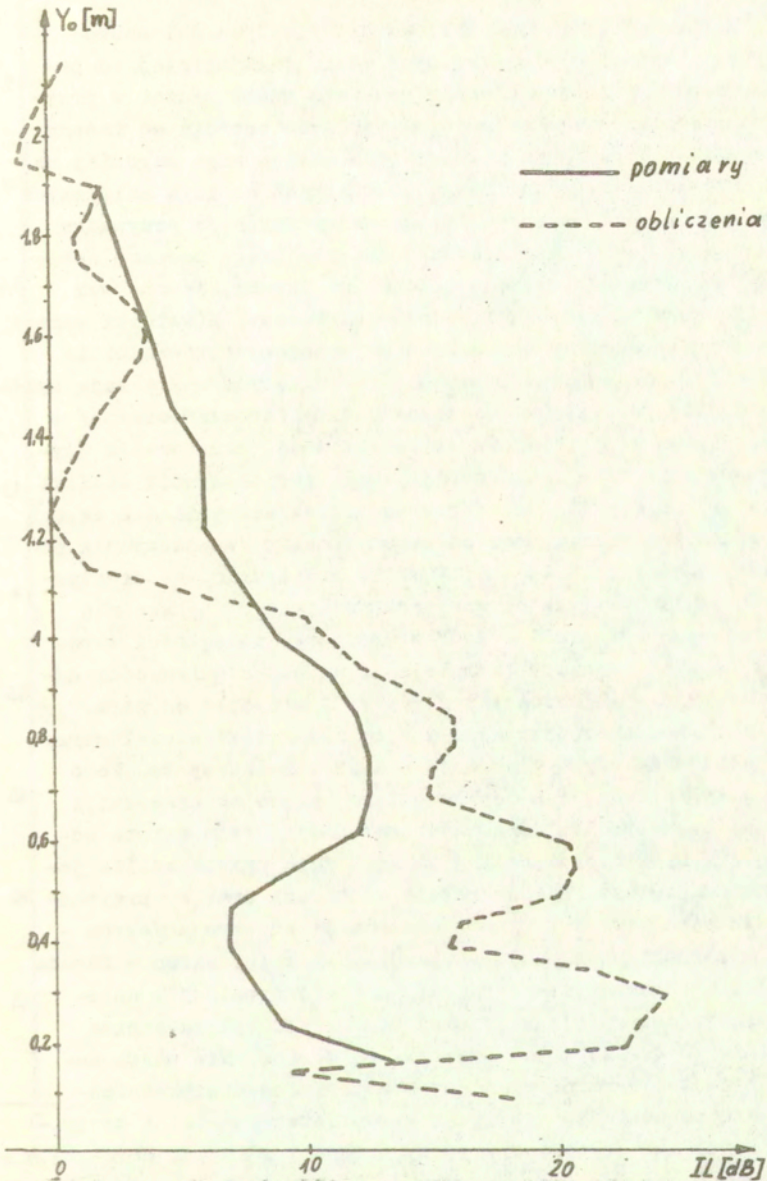
Rys. 5.14 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_0 punktu obserwacji nad podłożem, dla ekranu jednostronnie pochłaniającego, pasmo oktafowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=1.5$ m.



Rys. 6.15 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem, dla ekranu jednostronnie pochłaniającego, pasmo ośmiodobowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=2$ m.

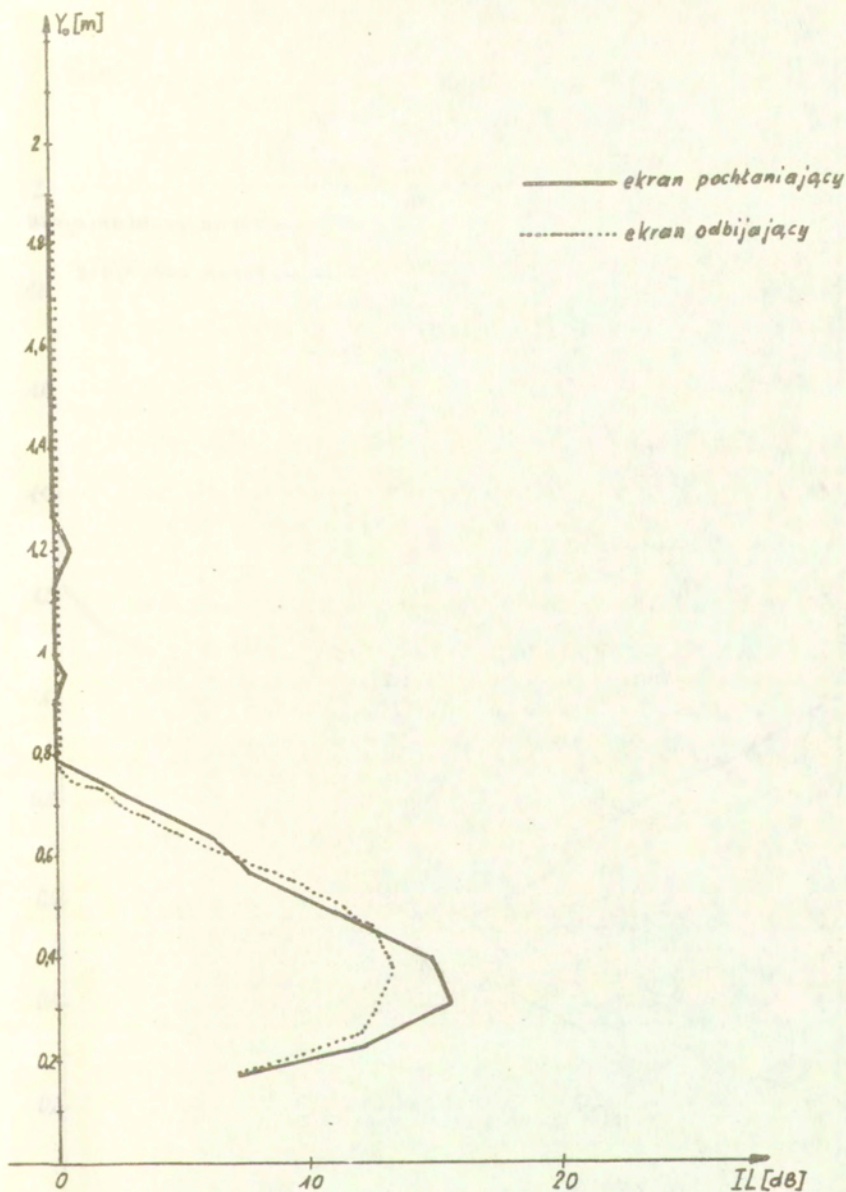


Rys. 6.16 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_0 punktu obserwacji nad podłożem, dla ekranu jednostronnie pochłaniającego, pasmo oktafowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=2.5$ m.

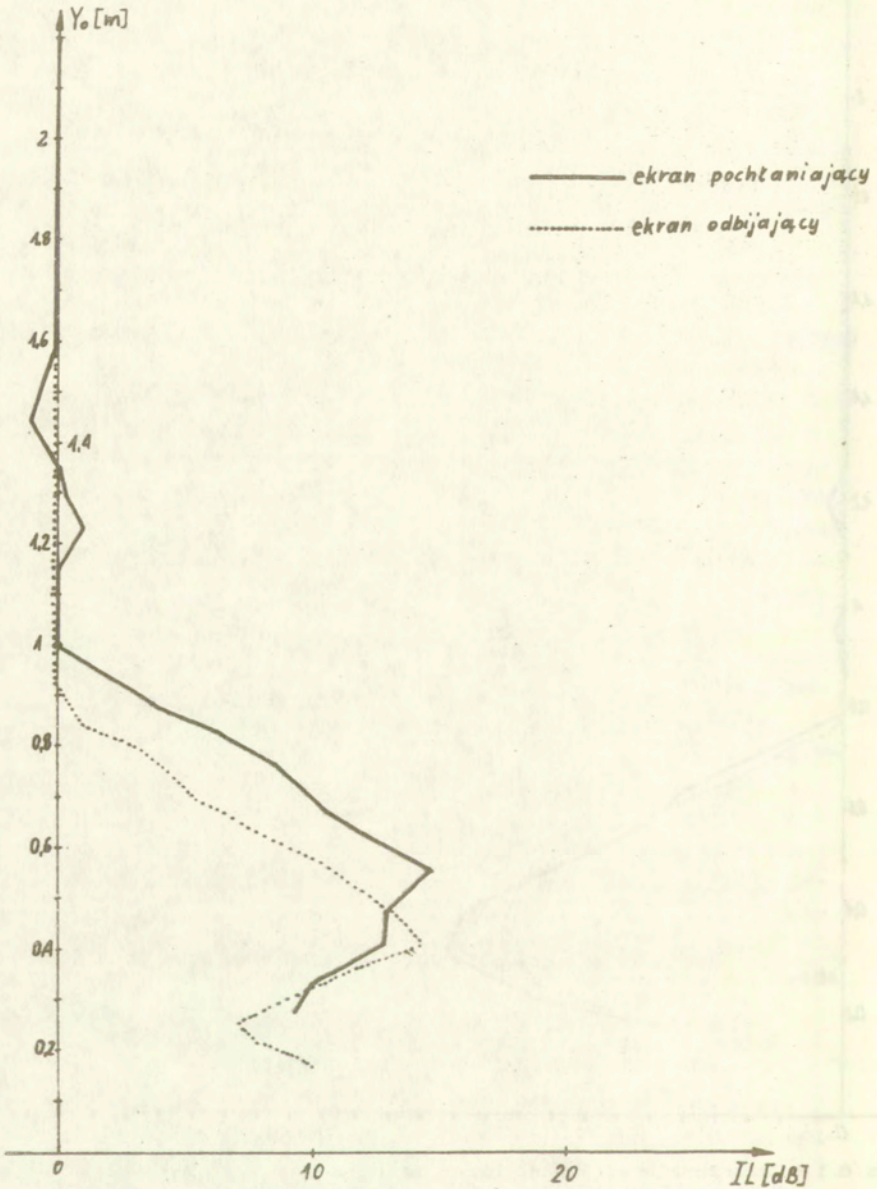


Rys. 6.17 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem, dla ekranu jednostronnie pochłaniającego, pasmo oktańowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=3$ m.

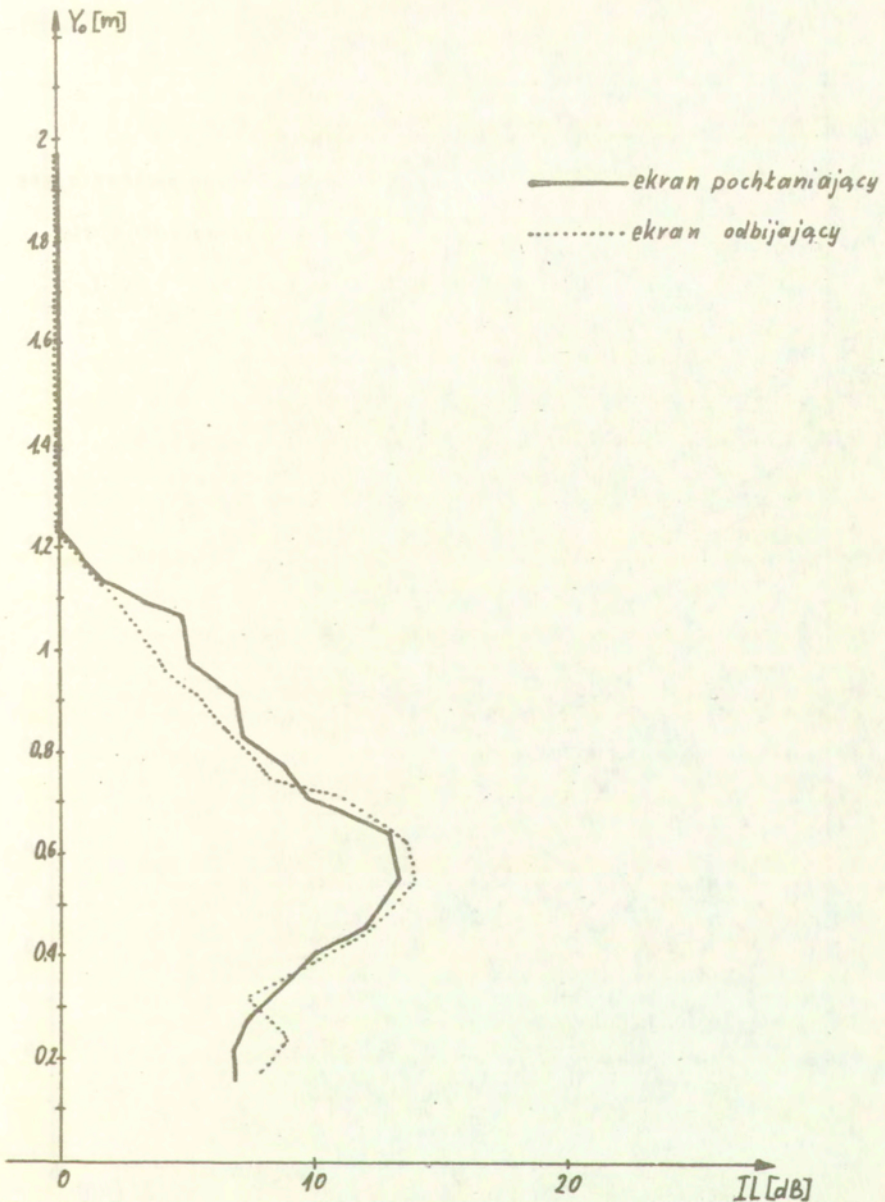
niewy, a zmierzoną. Ten niewielki wzrost efektywności spowodowany jest zjawiskiem wielokrotnych odbić fali ugiętej od powierzchni ekranu i fasady podczas gdy fala geometryczna w przypadku braku ekranu ulega co najwyżej jednemu odbiciu od fasady i jednemu od podłoża. Suma fal ugiętych maleje więc bardziej na skutek odbić od powierzchni o współczynnikach odbicia mniejszych od jedności niż suma czterech fal geometrycznych /w przypadku braku ekranu/ - jedna fala geometryczna nie ulega żadnemu odbiciu, dwie po jednym odbiciu od podłoża lub fasady, jedna dwóm odbiciom jednemu od podłoża i jednemu od fasady. Niewielki wzrost efektywności spowodowany wprowadzeniem współczynników odbicia świadczy o tym, że na wypadkowe pole fal ugiętych wpływ mają tylko odbicia niższych rzędów - pierwsze punkty /źródła pierwsze/ o małych indeksach k/n . Porównując efektywność ekranowania uzyskaną numerycznie dla ekranu odbijającego /współczynnik odbicia równy 0,8/ rys.6.8 - 6.12 z efektywnością ekranowania dla ekranu jednostrennie pochłaniającego od strony fasady /współczynnik odbicia równy 0,04/ rys.6.13 - 6.17 można stwierdzić, że efektywność ekranowania jest dla ekranu pochłaniającego większa niż dla odbijającego o około 1 - 2 dB w przypadku odległości ekran fasada równej 1 m. Różnica ta maleje ze wzrostem odległości ekran fasada, by dla odległości tej równej 2 m zmaleć do zera. Podobny efekt można zaobserwować w przypadku efektywności otrzymanej z badań modelowych /rys.6.18 - 6.22/. Świadczy to, że o wartości sumy fal ugiętych decyduje fala ugięta na krawędzi i docierająca bezpośrednio do punktu obserwacji, fala ugięta odbita jednokrotnie od płaszczyzny fasady, fala ugięta odbita jednokrotnie od podłoża i jednokrotnie od fasady oraz w przypadku niewielkiej odległości punktu obserwacji od ekranu /ekran - fasada 1 m ; punkt obserwacji - ekran 0,8 m ; lub ekran - fasada 1,5 m ; punkt obserwacji - ekran 1,3 m/ porównywalnej z odległością punktu obserwacji od fasady 0,2 m, fala ugięta odbita jednokrotnie od fasady i jednokrotnie od ekranu. Nie warto wobec tego stosować ekranów wyłożonych materiałem dźwiękochłonnym ponieważ powoduje to niewielki wzrost efektywności i to tylko dla niewielkich odległości między ekranem, a fasadą chronionego budynku.



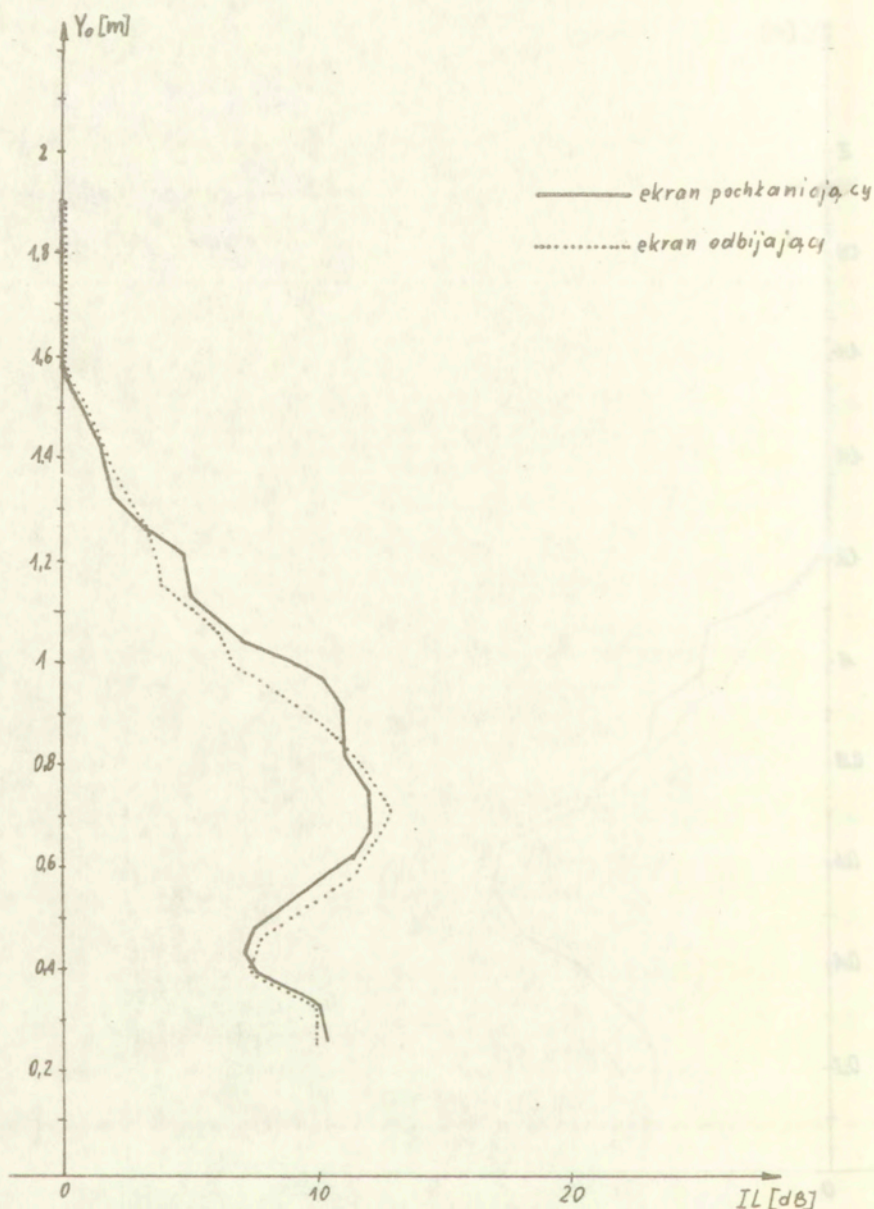
Rys. 8.18 Zmierzona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_0 punktu obserwacji nad podłożem, dla dwóch ekranów: obustronnie odbijającego i jednostronnie pochłaniającego, dla pasma oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz i odległości ekranu od płaszczyzny fasady $g=1m$.



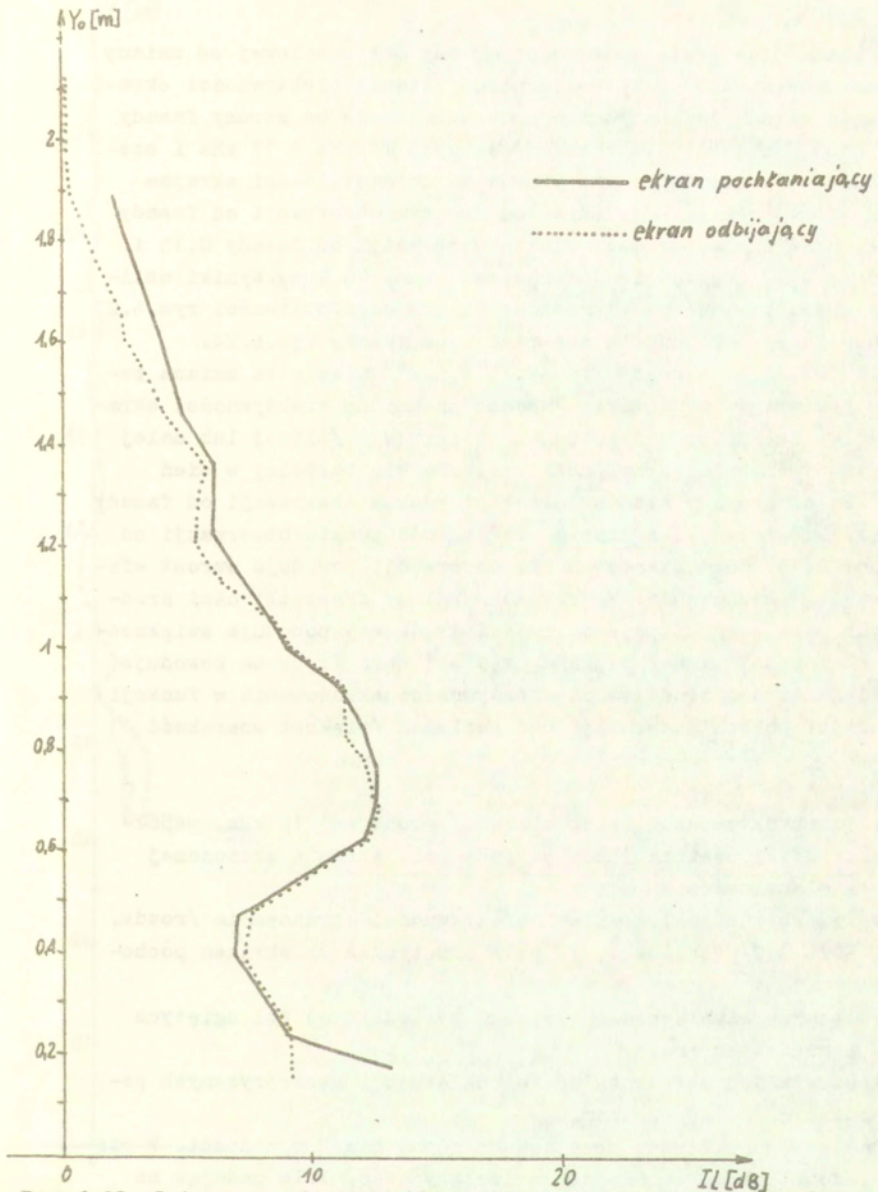
Rys. 6.19 Zmierzona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem, dla dwóch ekranów: obustronnie odbijającego i jednostronnie pochłaniającego, dla pasma oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz i odległości ekranu od płaszczyzny fasady $q=1.5$ m.



Rys. 6.20 Zmierzona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem, dla dwóch ekranów: obustronnie odbijającego i jednostronnie pochłaniającego, dla pasma oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz i odległości ekranu od płaszczyzny fasady $g=2$ m.



Rys. 6.21 Zmierzona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem, dla dwóch ekranów: obustronnie odbijającego i jednostronnie pochłaniającego, dla pasma oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz i odległości ekranu od płaszczyzny fasady $g=2.5$ m.



Rys. 6.22 Zmierzona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_0 punktu obserwacji nad podłożem, dla dwóch ekranów: obustronnie odbijającego i jednostronnie pochłaniającego, dla pasma oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz i odległości ekranu od płaszczyzny fasady $g=3$ m.

Celem sprawdzenia zależności metody obliczeniowej od zmiany parametrów układu przeprowadzono obliczenia efektywności ekranowania ekranu jednostronnie pochłaniającego od strony fasady dla pasm o częstotliwościach środkowych 15 kHz i 17 kHz i szerokościach wynikających ze wzorów na częstotliwości skrajne pasm oktawowych $g = 1$, odległość punktu obserwacji od fasady 0,2/, oraz dla odległości punktu obserwacji od fasady 0,15 i 0,25 $g = 1$, częstotliwość środkowa pasma 16 kHz/. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach: zmiana częstotliwości rys.6.23 zmiana odległości punktu obserwacji od fasady rys.6.24.

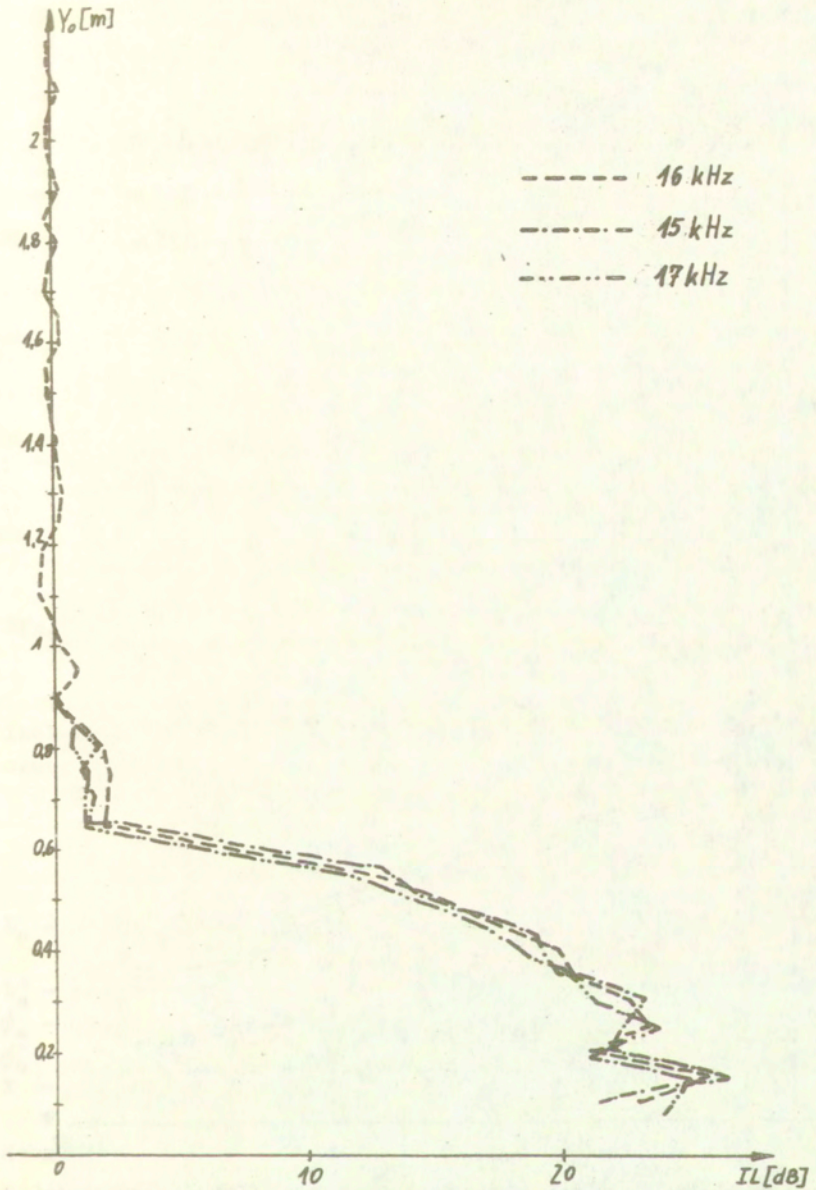
Jak widać z wykresów /rys.6.22 i 6.23/ niewielka zmiana parametrów wpływa w niewielki sposób na zmianę efektywności ekranowania. Zmiana pozornego punktu obserwacji /bliżej lub dalej od fasady/ powoduje, że punkt zagłębia się bardziej w cień /oddala od granicy cienia odległość punktu obserwacji od fasady 0,25/, lub wychodzi z cienia - odległość punktu obserwacji od fasady 0,15. Zagłębianie punktu obserwacji powoduje wzrost efektywności ekranowania. W przypadku zmiany częstotliwości środkowych pasm /wzrost częstotliwości środkowej powoduje zwiększenie szerokości pasma/, większa częstotliwość środkowa powoduje zmniejszenie amplitudy wahań efektywności ekranowania w funkcji wysokości punktu obserwacji nad podłożem /większa szerokość pasma/.

6.4. Pasma oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, współczynniki odbicia różne od jedności, ekran o skończonej izolacyjności.

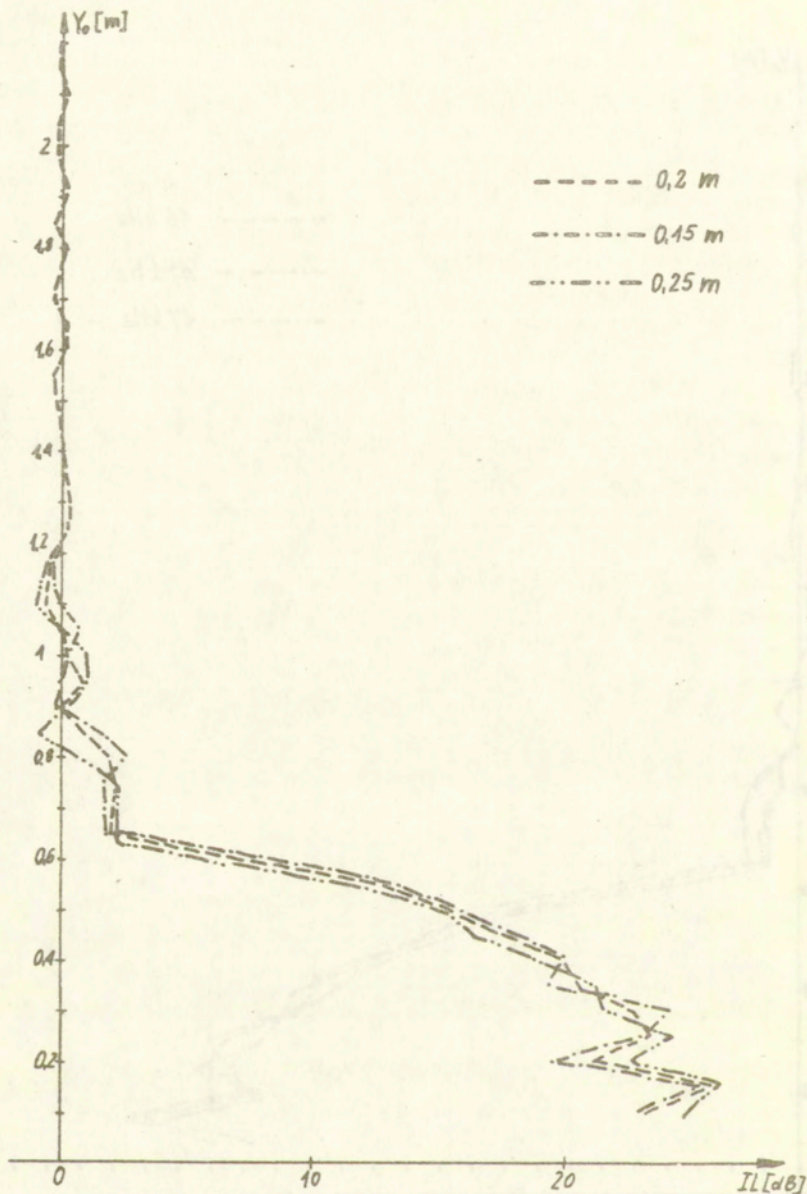
We wszystkich obliczeniach efektywności ekranowania /rozd. 6.1, 6.2, 6.3/ zakładano, że pole akustyczne za ekranem pochodzi:

- w obszarze cienia geometrycznego wyłącznie od fal ugiętych na krawędzi ekranu,
- w pozostałych obszarach od fal ugiętych i geometrycznych pochodzących ponad ekranem.

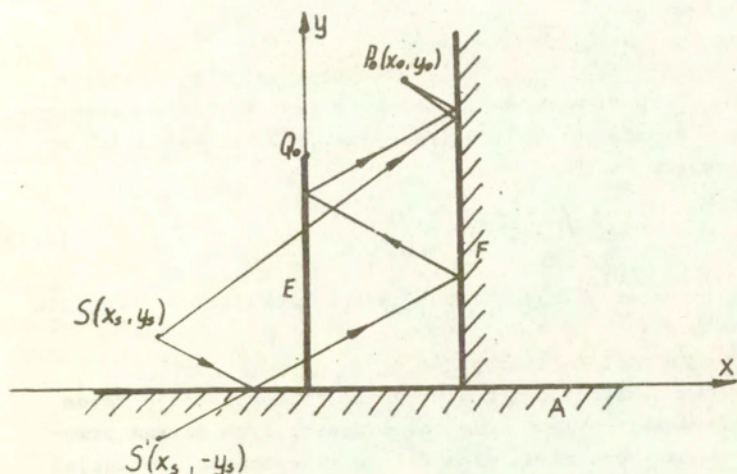
Izolacyjność ekranu przyjmowano równą nieskończoności. W rzeczywistości ekran ma skończoną izolacyjność. Fale padając na ekran transmitują się poprzez niego na drugą stronę, a następnie ulegają odbiciom od płaszczyzn podłoża, fasady i ekranu /rys.6.25/



Rys. 6.23 Obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem, dla pasm o trzech różnych częstotliwościach środkowych i szerokościach wynikających ze wzoru na skrajne częstotliwości pasma oktawowego.



Rys. 6.24 Obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem, dla trzech różnych odległości punktu obserwacji od płaszczyzny fasady.



Rys.6.25. Fale pochodzące ze źródeł S oraz S' i docierające do punktu obserwacji P₀ po transmisji poprzez ekran E.

Izolacyjność ekranu jest to różnica poziomu ciśnienia akustycznego fali padającej na ekran i przeniesionej:

$$L_t = L_o - L'_o = 20 \lg \left| \frac{\phi'_o}{\phi_o} \right| = -20 \lg T, \quad (6.11)$$

L_o - poziom ciśnienia akustycznego przy ekranie od strony źródła,

L'_o - poziom ciśnienia akustycznego za ekranem,

ϕ_o - potencjał akustyczny fali padającej na ekran,

ϕ'_o - potencjał akustyczny fali przeniesionej przez ekran,

T - transmitancja ekranu.

W przypadku braku ekranu do punktu obserwacji dochodzą fale geometryczne, których potencjał wypadkowy można określić:

$$\phi_{gH} = A_g \exp(i \varphi_g), \quad (6.12)$$

A_g - amplituda sumy fal geometrycznych docierających do punktu obserwacji,

φ_g - faza sumy fal geometrycznych.

Gdy pomiędzy źródłem S , a punktem obserwacji P_0 znajduje się ekran, a punkt obserwacji położony jest w cieniu geometrycznym do P_0 docierają fale dyfrakcyjne, których potencjał wypadkowy wyraża się:

$$\phi_{dM} = A_d \cdot \exp(i\varphi_d), \quad (6.13)$$

A_d - amplituda sumy fal dyfrakcyjnych docierających do punktu obserwacji,

ϕ_d - faza sumy fal dyfrakcyjnych.

Gdy ekran ma skończoną izolacyjność /transmitancję T / do punktu obserwacji oprócz sumy fal dyfrakcyjnych dotrze przetransmitowana przez ekran suma fal geometrycznych. Potencjał wypadkowy w punkcie obserwacji można wyrazić:

$$\phi'_d = A_d \cdot \exp(i\varphi_d) + T \cdot A_g \cdot \exp(i\varphi_g). \quad (6.14)$$

Z uwagi na to, że efektywność ekranowania jest określona jako różnica poziomu ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji przy braku ekranu i gdy znajduje się on między źródłem, a punktem obserwacji, określić można efektywność ekranowania. W przypadkach gdy ekran ma nieskończoną izolacyjność i gdy ma izolacyjność /transmitancję T /:

$$IL = 10 \lg \left(\frac{A_M}{A_d} \right)^2, \quad (6.15)$$

IL - efektywność ekranowania ekranu o nieskończonej izolacyjności,

$$IL_t = 10 \lg \frac{A_g^2}{A_d^2 + T^2 A_g^2 + 2T A_d A_g \cos(\varphi_d - \varphi_g)}, \quad (6.16)$$

IL_t - efektywność ekranowania ekranu o izolacyjności L_t /transmitancji T /.

Różnica ΔIL między efektywnością ekranowania ekranu o nieskończonej izolacyjności i ekranu o izolacyjności L_t wyraża się

wzorem:

$$\Delta IL = IL - IL_t \quad (6.17)$$

Wstawiając do (6.17) wyrażenie (6.15) i (6.16) uzyskuje się wyrażenie określające ΔIL :

$$\Delta IL = 10 \lg \left[1 + 2T \left(\frac{A_g}{A_d} \right) \cdot \cos(\varphi_d - \varphi_g) + \left(\frac{A_g}{A_d} \right)^2 \right] \quad (6.18)$$

Różnica między efektywnościami ekranowania ekranu o nieskończonej izolacyjności i efektywnościami ekranowania ekranu o izolacyjności L_t /Transmitancji T/ przyjmuje wartości ekstremalne dla:

$$\cos(\varphi_d - \varphi_g) = \pm 1 \quad (6.19)$$

Wstawiając do (6.18) wartości ze wzoru (6.19) i zastępując transmitancję T ze wzoru (6.11) oraz iloraz A_g/A_d ze wzoru (6.15) uzyskuje się wzór na ekstremalne wartości ΔIL_e :

$$\Delta IL_e = 10 \lg \left(1 \pm 10^{\frac{IL - L_t}{20}} \right)^2 \quad (6.20)$$

ΔIL_e - ekstremalne wartości różnic między efektywnościami ekranowania dla ekranu o nieskończonej izolacyjności i ekranu o izolacyjności L_t .

Wartości ekstremalne różnic efektywności ΔIL_e w funkcji efektywności IL ekranowania ekranu o nieskończonej izolacyjności dla różnych wartości izolacyjności ekranu L_t przedstawione na wykresach 6.26 - 6.29.

Obliczone wartości efektywności ekranowania w granicach cienia geometrycznego dla $L_t = \infty$ miały wartości 10-25 dB /rys.6.8-6.15/. Dla takich wartości efektywności ekranowania błąd spowodowany przyjęciem nieskończonej izolacyjności ekranu może wynieść kilkanaście dB /rys.6.26 - 6.29 obszar zakresowany/.

W celu uniknięcia błędów spowodowanych przyjęciem nieskończonej izolacyjności ekranu należy w obliczeniach uwzględnić transmisję przez ekran o skończonej izolacyjności.

Z uwagi na skończoną wysokość ekranu fale przenikające przez ekran E i odbite od płaszczyzn fasady, podłoża i ekranu /rys.6.25/

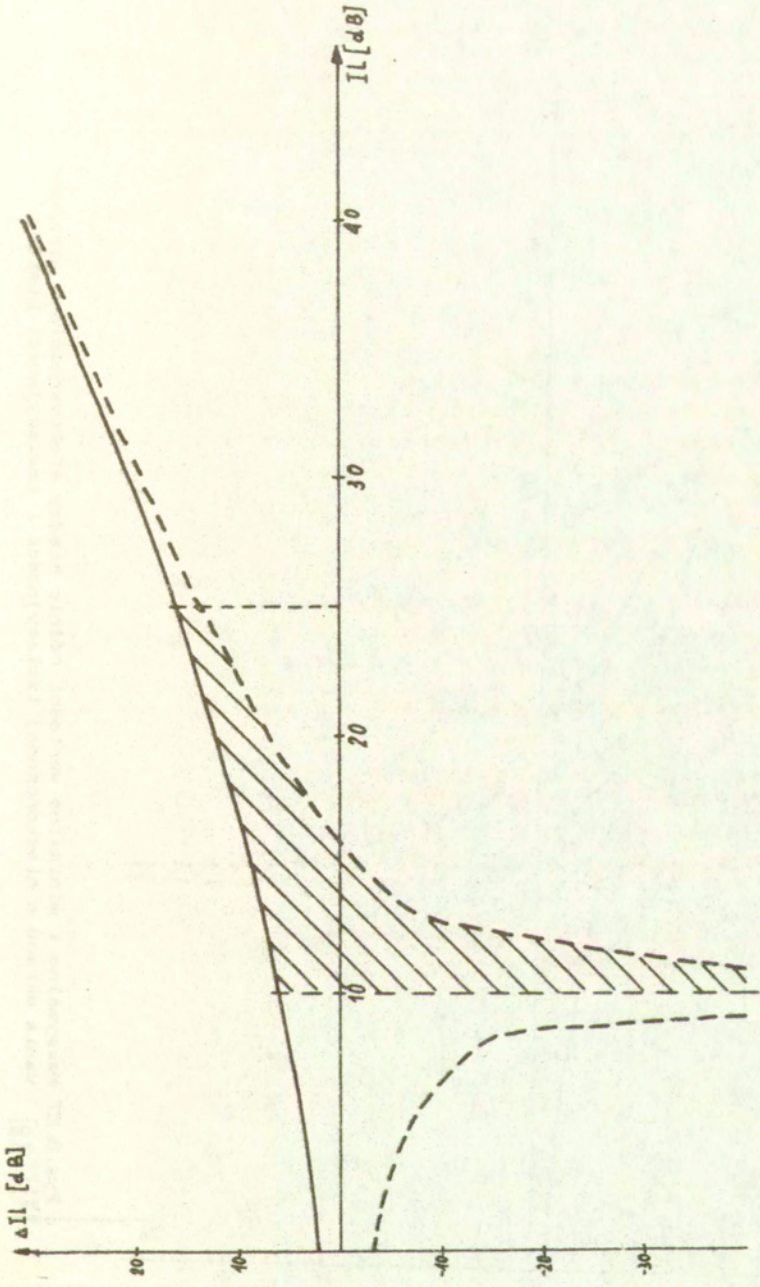
dotrą lub nie do punktu obserwacji P_o w zależności od jego wysokości nad podłożem A. Liczba fal docierających do punktu obserwacji zależy będzie od współrzędnych położenia źródła rzeczywistego S (x_s, y_s), punktu obserwacji $P_o(x_o, y_o)$, wysokości ekranu h i odległości g ekranu E od fasady F /rys.6.25/.

6.4.1. Określenie liczby fal przeniesionych przez ekran docierających do punktu obserwacji.

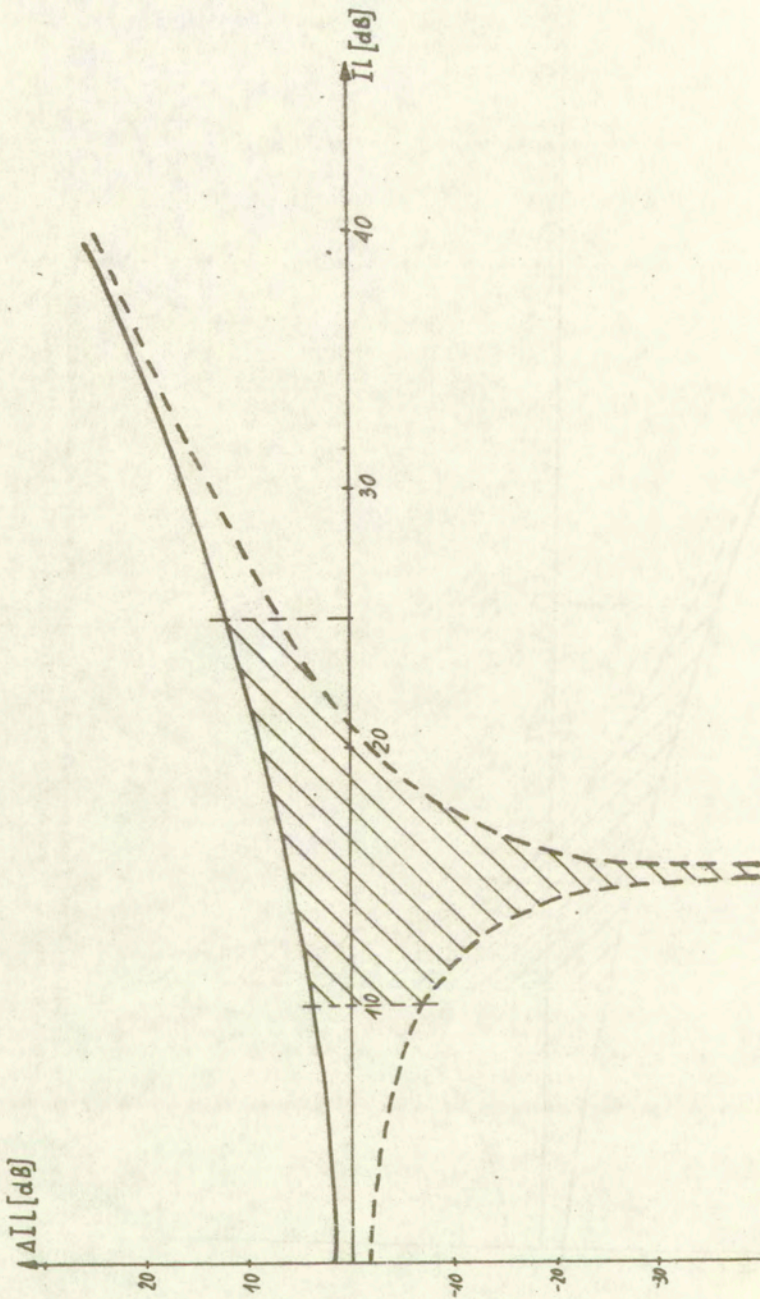
Poniżej pokazana zostanie metoda obliczania maksymalnego rzędu źródła pozornego /co odpowiada liczbie fal przetransmitowanych przez ekran i po odbiciach od płaszczyzny podłoża, fasady oraz ekranu docierających do punktu obserwacji /w zależności od geometrii układu A, E, F położenie źródła rzeczywistego S i rzeczywistego punktu obserwacji P_o . Obliczony zostanie maksymalny rząd źródeł pozornych S_m , a następnie na podstawie zależności między rzędem źródeł pozornych S_m i pozornych punktów obserwacji P_n określony zostanie rząd pozornych punktów obserwacji /odpowiadający ilości odbić jakich doznaje fala przetransmitowana przez ekran na drodze ze źródła rzeczywistego S do rzeczywistego punktu obserwacji P_o /.

Rozpatrz one zostaną cztery przypadki:

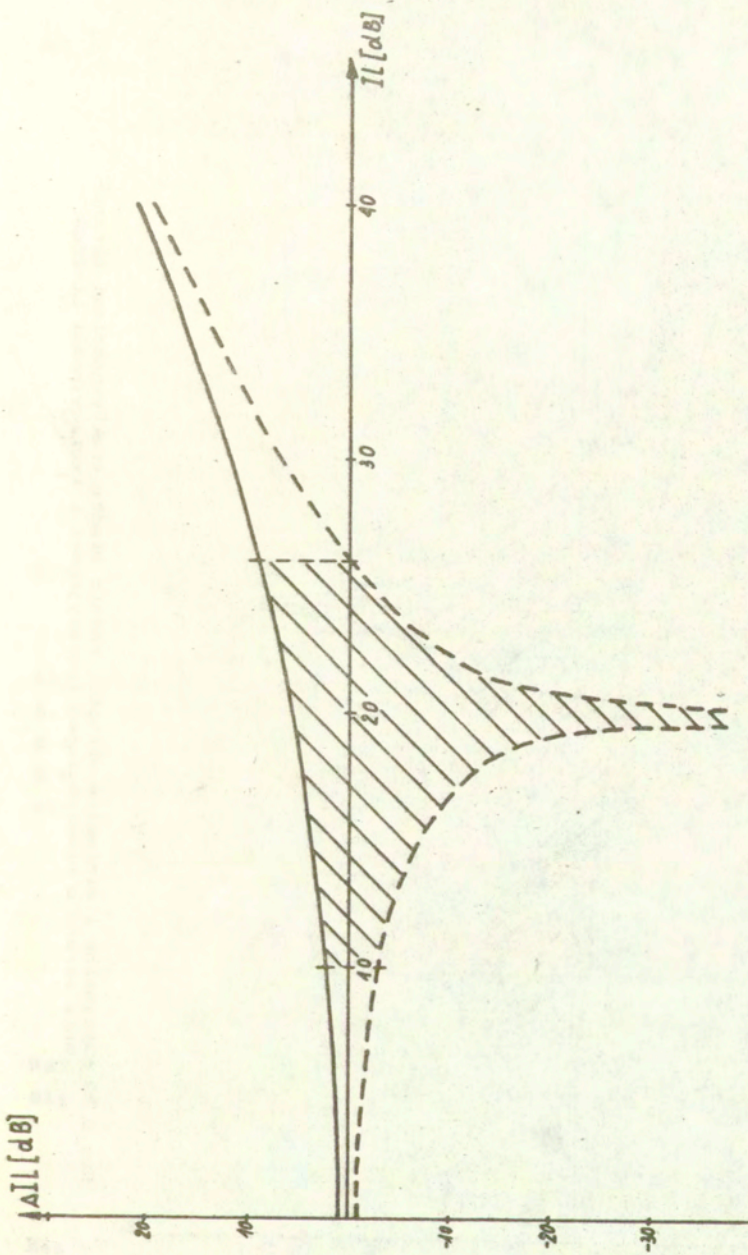
- a/ fala ze źródła rzeczywistego S przenika przez ekran E i po odbiciach między płaszczyznami E i F dociera do punktu obserwacji P_o - ostatnie odbicie nastąpiło od płaszczyzny ekranu E,
- b/ fala ze źródła rzeczywistego S przenika przez ekran E i po odbiciach między płaszczyznami E i F dociera do punktu obserwacji P_o - ostatnie odbicie nastąpiło od płaszczyzny fasady F,
- c/ fala ze źródła rzeczywistego S po odbiciu od płaszczyzny podłoża A /źródło pozorne S' / przenika przez ekran E i po odbiciach między płaszczyznami E i F dociera do punktu obserwacji P_o - ostatnie odbicie nastąpiło od płaszczyzny ekranu E,
- d/ fala ze źródła rzeczywistego S po odbiciu od płaszczyzny podłoża A /źródło pozorne S' / przenika przez ekran E i po odbiciach między płaszczyznami E i F dociera do punktu obserwacji P_o - ostatnie odbicie nastąpiło od płaszczyzny fasady F.



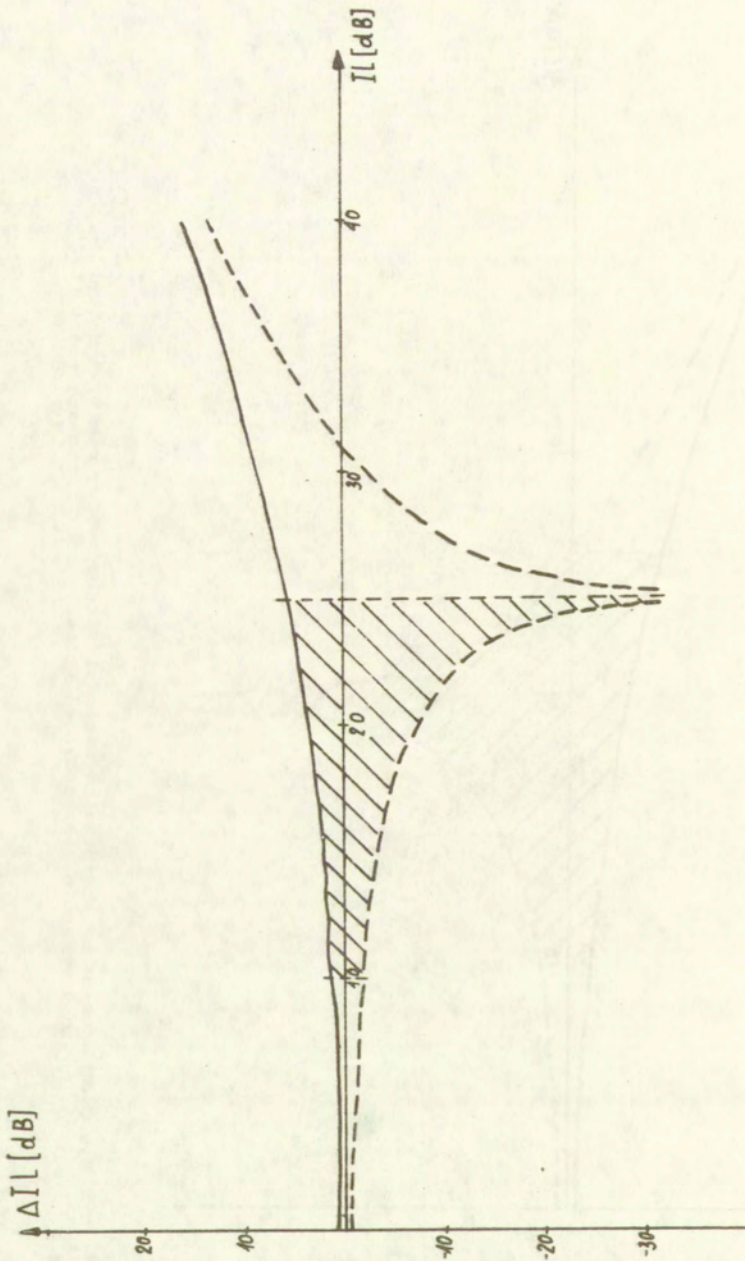
Rys. 6. 20 Maksymalne i minimalne wartości różnic między efektywnościami ekranowania ekranu o nieskończonej izolacyjności i izolacyjności $L_t=10$ dB.



Rys. 6.27 Maksymalne i minimalne wartości różnic między efektywnościami ekranowania ekranu o nieskończonej izolacyjności i izolacyjności $L_t=15$ dB.

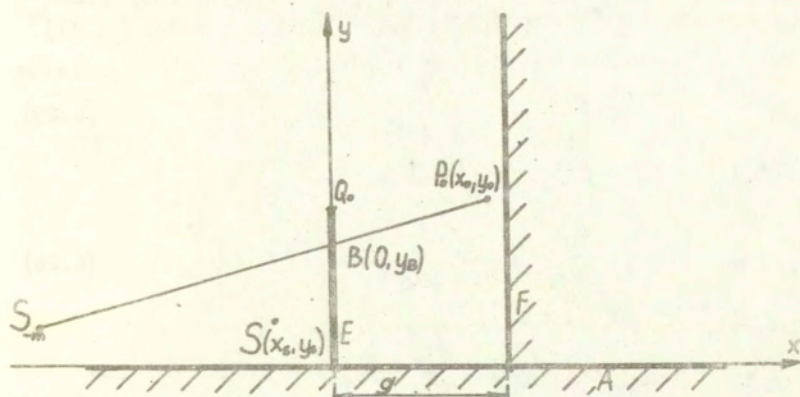


Rys. 6. 28 Maksymalne i minimalne wartości różnic między efektywnościami ekranowania ekranu o nieskończonej izolacyjności i izolacyjności $L_t = 20$ dB.



Rys. 6.29 Maksymalne i minimalne wartości różnic między efektywnościami ekranowania ekranu o nieskończonej izolacyjności i izolacyjności $L_t = 25$ dB.

ad a/



Rys. 6.30. Przypadek gdy odbicia następują między płaszczyznami E i F - ostatnie odbicie od płaszczyzny E.

Aby ostatnie odbicie nastąpiło od płaszczyzny ekranu E /rys. 6.30/ prosta łącząca źródło pozorne $S_{-m}(z_{dm} + x_s, y_s)$; $m = 0, -1, -2, \dots$ z punktem obserwacji P_0 musi przecinać ekran E w punkcie B na wysokości mniejszej bądź równej wysokości ekranu h:

$$y_B \leq h, \quad (6.21)$$

$$y_B = y_0 + \frac{x_0(y_0 - y_s)}{2gm + x_s - x_0} \sim m \leq 0. \quad (6.22)$$

Wstawiając y_B z równania (6.22) do nierówności (6.21) uzyskuje się nierówność:

$$2gm(y_0 - h) \geq x_0(y_0 - h) - x_s(y_0 - h) \sim m \leq 0. \quad (6.23)$$

Rozważone są dwie możliwości:

a₁/

$$y_0 \leq h. \quad (6.24)$$

Z uwagi na to, że $y_0 > 0$, $y_S < h$, $x_S < 0$, $y_0 < h$ /rys.6.30/ prawa strona nierówności (6.23) jest ujemna więc nierówności (6.23) i (6.24) są spełnione dla każdego $m \leq 0$,

a₂/

$$y_0 > h. \quad (6.25)$$

Z nierówności (6.23) i (6.25) wynika, że:

$$-m \leq \frac{x_S(y_0 - h) - x_0(y_S - h)}{2g(y_0 - h)} \cap m \leq 0, \quad (6.26)$$

ad b/

Aby ostatnie odbicie reprezentowane poprzez źródło pozorne $S_m [2gm - x_S, y_S]$ $m = 1, 2, 3 \dots$ nastąpiło od płaszczyzny fasady F , przedostatnie odbicie /od płaszczyzny ekranu E / reprezentowane poprzez źródło pozorne $S_{-(m-1)} [2g(m-1) + x_S, y_S]$, $m = -1, -2, -3 \dots$ musi nastąpić na wysokości y_B mniejszej bądź równej wysokości ekranu h . Prosta łącząca punkty $S_{-(m-1)}$ i C /rys.6.31/ musi przeciąć płaszczyznę ekranu w punkcie $B(0, y_B)$ spełniającym warunek:

$$y_B \leq h, \quad (6.27)$$

$$y_B = y_0 - \frac{(2g - x_0)(y_0 - y_S)}{2gm - x_0 - x_S} \cap m \geq 1. \quad (6.28)$$

Po wstawieniu y_B z (6.28) do nierówności (6.27) uzyskuje się nierówności:

$$2gm(y_0 - h) \leq 2g(y_0 - y_S) + x_0 y_0 + x_S y_0 - h(x_0 + x_S) \cap m \geq 1. \quad (6.29)$$

Podobnie jak dla a rozpatrywane są możliwości:

b₁/

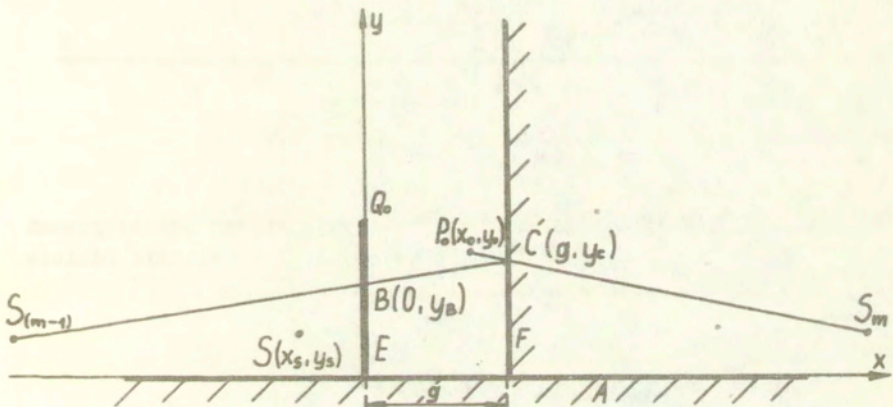
$$y_0 \leq h, \quad (6.30)$$

nierówności (6.29) i (6.30) spełnione są dla każdego m większego bądź równego jedności,

$$b_2 / \quad y_0 > h, \quad (6.31)$$

na podstawie (6.29) i (6.31) wyznaczone zostaje m :

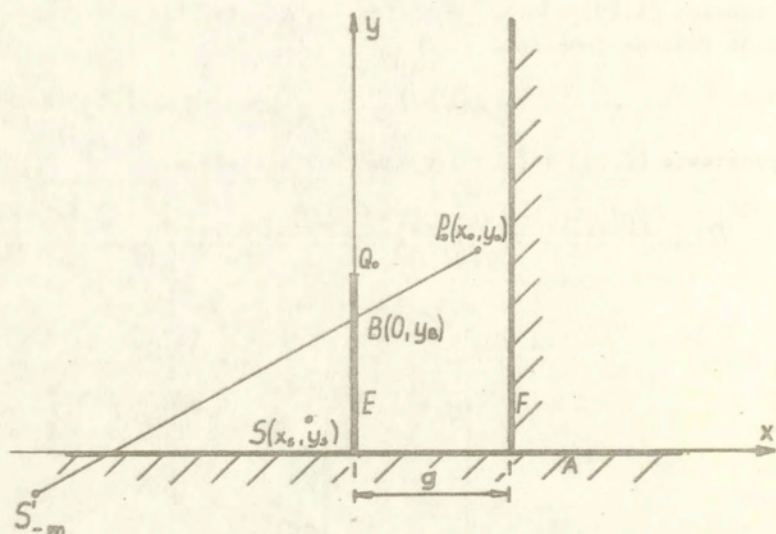
$$m \leq \frac{2g(y_0 - y_s) + x_0 y_s + x_s y_0 - h(x_0 + x_s)}{2g(y_0 - h)} \sim m \geq 1, \quad (6.32)$$



Rys.6.31. Przypadek gdy odbicia następują między płaszczyznami E i F - ostatnie odbicie od płaszczyzny F.

ad e/

Ostatnie odbicie /po uprzednim jednym odbiciu od podłoża A/ nastąpi od ekranu E /rys.6.32/ gdy punkt przecięcia prostej łączącej źródło pozorne $S_{-m} [2gm + x_s, -y_s]$, $m = 0, -1, -2, \dots$ i punkt obserwacji $P_0(x_0, y_0)$ z płaszczyzną ekranu E położony będzie na wysokości mniejszej bądź równej wysokości ekranu h .



Rys. 6.32. Przypadek gdy odbicia następują między płaszczyznami E i F oraz jedno od płaszczyzny A - ostatnie odbicie od płaszczyzny E.

Pe określeniu y_B uzyskuje się warunek:

$$2gm(y_0-h) \gg x_0(y_0-h) - x_s(y_0-h) \sim m \ll 0, \quad (6.33)$$

podobnie jak dla a i b rozpatrywane są przypadki:

$$c_1/ \quad y_0 \leq h, \quad (6.34)$$

warunki (6.33) i (6.34) spełnione są dla każdego m mniejszego bądź równego zero,

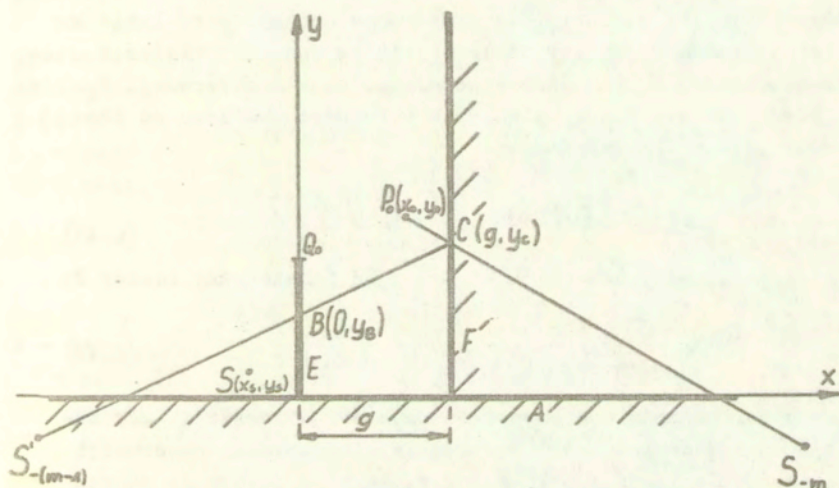
$$c_2/ \quad y_0 > h, \quad (6.35)$$

na podstawie nierówności (6.33) i (6.35) :

$$-m \leq \frac{x_s(y_o-h) + x_o(y_s+h)}{2g(y_o-h)} \wedge m \leq 0, \quad (6.36)$$

ad d/

Ostatnie odbicie /po uprzednim jednym odbiciu od podłoża A nastąpi od fasady F gdy punkt B przecięcie prostej łączącej źródło pozorne $S_{-(m-1)}^*$ $[2g(m+1) + x_s, -y_s]$, $m = -1, -2, -3...$ /przedostatnie odbicie od ekranu E/ i punkt C z płaszczyzną ekranu E /rys.6.33/ będzie położony na wysokości mniejszej bądź równej wysokości ekranu h.



Rys.6.33. Przypadek gdy odbicia następują między płaszczyznami E i F oraz jedno od płaszczyzny A - ostatnie odbicie następuje od płaszczyzny F.

Po określeniu współrzędnej y_B otrzymuje się warunek:

$$2gm(y_o-h) \leq 2g(y_o+y_s) - x_o y_s + x_s y_o - h(x_o+x_s) \wedge m \geq 1, \quad (6.37)$$

rozpatruje się dwa warunki:

$$d_1/ \quad y_0 \leq h, \quad (6.38)$$

nierówności (6.37) i (6.38) spełnione są dla każdego m mniejszego bądź równego jedności,

$$d_2/ \quad y_0 > h, \quad (6.39)$$

z nierówności (6.37) i (6.39) wynika:

$$m \leq \frac{2g(y_0 + y_s) - x_0 y_s + x_s y_0 - h(x_0 + x_s)}{2g(y_0 - h)} \cap m \geq 1. \quad (6.40)$$

Z uwagi na to, że końcowym rezultatem powinno być określenie k źródła pozornego P_k , należy znaleźć relację pomiędzy rzędem m źródła pozornego S_m i rzędem k pozornego punktu obserwacji P_k . Współrzędne iksowe źródeł pozornych położonych na lewo od płaszczyzny ekranu E określone są:

$$x_{S_{t+m}} = 2gm + x_s, \quad m = 0, -1, -2, \dots \quad (6.41)$$

a źródeł pozornych położonych na prawo od płaszczyzny fasady F :

$$x_{S_{(m)}} = 2gm - x_s, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (6.42)$$

Źródło pozorne odpowiada pozornemu punktowi obserwacji gdy odległość od źródła pozornego do rzeczywistego punktu obserwacji równa jest odległości źródła rzeczywistego od pozornego punktu obserwacji. Na podstawie porównania tych odległości wykorzystując (4.8), (6.41) i (6.42) określić można zależności między rzędem źródła pozornego S_m i rzędem k pozornego punktu obserwacji P_k :

$$k = -2m, \quad m = 0, -1, -2, \dots \quad (6.43a)$$

$$k = 2m - 1, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (6.43b)$$

Jak widać z (6.43) źródłem pozornym S_m położonym na prawo od płaszczyzny F odpowiadają nieparzyste pozorne punkty obserwacji, a położonym na lewo od płaszczyzny E parzyste pozorne punkty obserwacji P_k . Jest to sytuacja jak w przypadku gdy jako źródło tworzące źródła pozorne traktujemy krawędź ekranu Q_0 /rozdz.4.3/.

Korzystając z (6.43) można przenieść warunki uzyskane dla źródeł pozornych na pozorne punkty obserwacji.

W przypadku punktu obserwacji położonego na wysokości mniejszej bądź równej wysokości ekranu h powstanie nieskończona liczba pozornych punktów obserwacji P_k zarówno o numerach parzystych jak i nieparzystych położonych nad i poniżej płaszczyzny podłoża A /do punktu obserwacji docierać będzie nieskończona suma fal geometrycznych przetransmitowanych przez ekran i ulegającym gwałtownym odłamom od płaszczyzn fasady F, ekranu E i podłoża A/.

Dla punktu obserwacji położonego na wysokości większej niż wysokość ekranu h liczbę pozornych punktów obserwacji P_k można obliczyć na podstawie (6.41), (6.42), (6.26), (6.32), (6.36), i (6.40) :

- pozorny punkt obserwacji P_k położony powyżej płaszczyzny A, maksymalny parzysty numer k pozornego punktu obserwacji P_k :

$$k \leq \frac{x_s(y_0 - h) - x_0(y_s - h)}{g(y_0 - h)}, \quad (6.44)$$

k - całkowita dodatnia liczba parzysta / $k = 0, 2, 4, \dots$ /

- pozorny punkt obserwacji P_k położony powyżej płaszczyzny podłoża A, maksymalny nieparzysty numer k pozornego punktu obserwacji P_k :

$$k \leq \frac{2g(y_0 - y_s) + x_0 y_s + x_s y_0 - h(x_0 + x_s) - g(y_0 - h)}{g(y_0 - h)}, \quad (6.45)$$

k - całkowita dodatnia liczba nieparzysta / $k = 1, 3, 5, \dots$ /,

- pozorny punkt obserwacji P_k położony poniżej płaszczyzny podłoża P_k , maksymalny parzysty numer k pozornego punktu obserwacji P_k :

$$k \leq \frac{x_s(y_0 - h) + x_0(y_s + h)}{g(y_0 - h)}, \quad (6.46)$$

- k - całkowita dodatnia liczba parzysta / $k = 0, 2, 4, \dots$ /,
 - pozorny punkt obserwacji P_k położony poniżej płaszczyzny podłoża P_k , maksymalny nieparzysty numer k pozornego punktu obserwacji P_k :

$$k \ll \frac{2g(y_o + y_s) - x_o y_s + x_s y_o - h(x_o + x_s) - g(y_o - h)}{g(y_o - h)}, \quad (6.47)$$

- k - całkowita nieparzysta liczba dodatnia / $k = 1, 3, 5, \dots$ /.
 Potencjał akustyczny w pozornym punkcie obserwacji fali przetransmitowanej przez ekran będzie wynosił:

$$\phi^g(P_k) = (b_E)^{m_E} \cdot (b_F)^{m_F} \cdot (b_A)^{m_A} \cdot T \cdot \phi^g(S, P_k). \quad (6.48)$$

- b_E - współczynnik odbicia ekranu,
 b_A - współczynnik odbicia podłoża,
 b_F - współczynnik odbicia fasady,
 m_E - liczba odbić od ekranu,
 m_F - liczba odbić od fasady,
 m_A - liczba odbić od podłoża,
 T - transmitancja ekranu określona na podstawie (6.11),
 $\phi^g(S, P_k)$ - potencjał akustyczny fali geometrycznej w punkcie pozornym P_k pochodzącym od źródła S_g .

Poniżej określone zostaną liczby odbić od kolejnych płaszczyzn dla odpowiednich pozornych punktów obserwacji P_k .

Gdy pozorny punkt obserwacji znajduje się powyżej płaszczyzny podłoża A możliwe są dwa przypadki:

- pierwszy gdy k jest parzyste wtedy:

$$m_A = 0, \quad m_E = \frac{k}{2}, \quad m_F = \frac{k}{2}, \quad (6.49)$$

- drugi gdy k jest nieparzyste, wtedy:

$$m_A = 0, \quad m_E = \frac{k-1}{2}, \quad m_F = \frac{k+1}{2}. \quad (6.50)$$

Gdy pozorny punkt obserwacji P_k znajduje się poniżej płaszczyzny podłoża A również możliwe są dwa przypadki:

- dla k parzystych:

$$m_A = 1, m_E = \frac{k}{2}, m_F = \frac{k}{2}, \quad (6.51)$$

- dla k nieparzystych:

$$m_A = 1, m_E = \frac{k-1}{2}, m_F = \frac{k+1}{2}. \quad (6.52)$$

Poniżej określone zostaną fale docierające do przykładowego punktu obserwacji P_0 dla jednej z sytuacji zmierzoney w badaniach modelowych.

$$S (-1, 0, 15),$$

$$P_0 (0, 8, 0, 8),$$

$$h = 0, 4,$$

$$g = 1,$$

a/ fale geometryczne:

na podstawie (4.24), (4.25), (4.26), (4.27) do punktu obserwacji dotrą dwie fale SP_0 i SFP_0 /bezpośrednia ze źródła do punktu obserwacji oraz źródło; odbicie od fasady F ; punkt obserwacji/ rys.6.34:

$$\phi_g(S, P_0) = \frac{\exp(ikr_{SP_0})}{r_{SP_0}}, \quad (6.53)$$

r_{SP_0} - odległość między źródłem S i punktem obserwacji P_0
/rys.6.34/

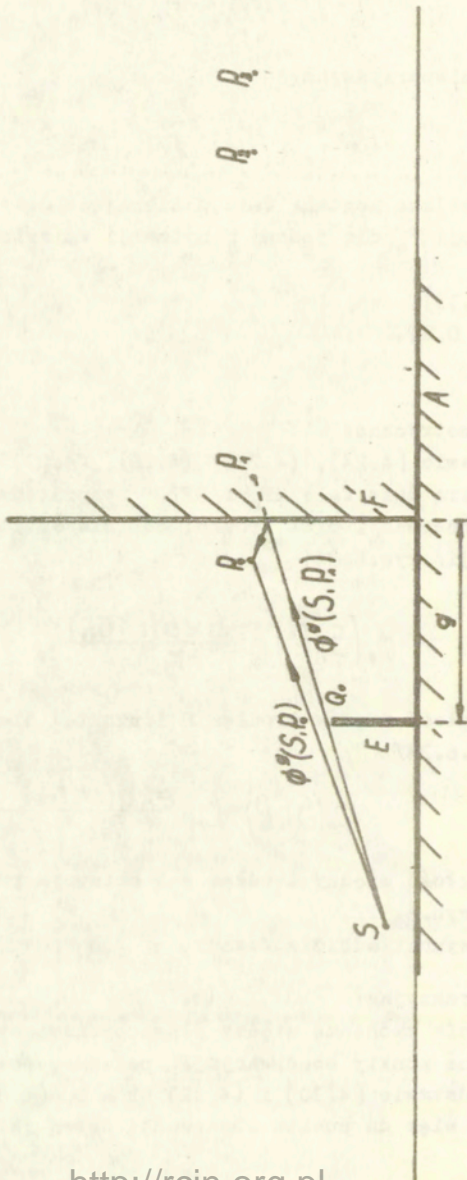
$$\phi_g(S, F, P_0) = b_F \frac{\exp(ikr_{SP_0})}{r_{SP_0}}, \quad (6.54)$$

r_{SP_1} - odległość między źródłem S i pozornym punktem obserwacji P_1 /rys.6.32/

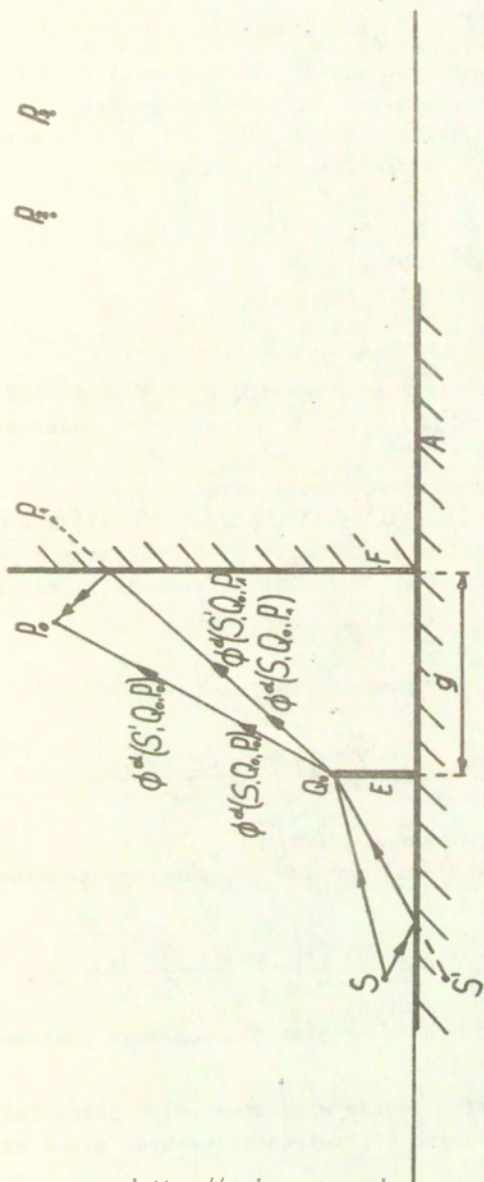
b_F - współczynnik odbicia fasady,

b/ fale dyfrakcyjne:

gdy odbicia zachodzą między płaszczyznami ekranu E i fasady F /pozorne punkty obserwacji P_k położone powyżej płaszczyzny A / na podstawie (4.30) i (4.32) $k = 0$, (4.36) i (4.38) $k = 1$, a więc do punktu obserwacji dotrą fale /rys.6.35/



Rys. 6.34 Fale geometryczne docierające do punktu obserwacji Po ze źródła S.



Rys. 6.35 Fale geometryczne docierające do punktu obserwacji Po gdy odbicia zachodzą między płaszczyznami EF.

- $SQ_0 P_0 \quad \phi^d (SQ_0 P_0)$,
- $SAQ_0 P_0 \quad \phi^d (S^* Q_0 P_0)$,
- $SQ_0 P_1 \quad \phi^d (SQ_0 P_1)$,
- $SAQ_0 P_1 \quad \phi^d (S^* Q_0 P_1)$.

Dla odbić zachodzących między płaszczyznami E, F i podłoża A /pozorne punkty obserwacji P_k położone poniżej płaszczyzny A/ na podstawie (4.51) $k = 0$, (4.52) $k = 1$, $k = 3$, a więc do punktu obserwacji P_0 dotrą fale /rys.6.36/:

- $SQ_0 A P_0 \quad \phi^d (SQ_0 P_0^*)$,
- $SAQ_0 A P_0 \quad \phi^d (S^* Q_0 P_0^*)$,
- $SQ_0 A P_1 \quad \phi^d (SQ_0 P_1^*)$,
- $SAQ_0 A P_1 \quad \phi^d (S^* Q_0 P_1^*)$,
- $SQ_0 A E F P_0 \quad \phi^d (SQ_0 P_3^*)$,
- $SAQ_0 A E F P_0 \quad \phi^d (S^* Q_0 P_3^*)$,

gdzie wszystkie potencjały $\phi^d (S, Q_0, P_k)$, $\phi^d (S^*, Q_0, P_k)$, $\phi^d (SQ_0 P_k^*)$, $\phi^d (S^* Q_0, P_k^*)$ obliczone na podstawie (3.21),

c/ fale przetransmitowane przez ekran:

na podstawie (6.44), (6.45), (6.46), (6.47) $k = 0$, $k = 1$ dla pozornych punktów obserwacji P_k położonych poniżej płaszczyzny podłoża A. Do punktu obserwacji P_0 dotrą fale /rys.6.37/

- $SAP_0 \quad \phi^{ST} (SP_0^*)$,
- $SAFP_0 \quad \phi^{ST} (SP_1^*)$,

gdzie:

$$\phi^{ST}(S, P_0^*) = T \cdot \frac{\exp(ikr_{Sg})}{r_{Sg}} \quad , \quad (6.55)$$

T - transmitancja ekranu (5.11),

$r_{SP_0^*}$ - odległość między źródłem S i pozornym punktem obserwacji P_0^* /rys.6.37/.

$$\phi^{ST}(S, P_1^*) = T \cdot \frac{\exp(ikr_{Sg})}{r_{Sg}} \quad , \quad (6.56)$$

$r_{SP_1^*}$ - odległość między źródłem S i pozornym punktem obserwacji P_1^* /rys.6.37/.

Potencjał całkowity będzie więc sumą potencjałów fal geometrycznych, dyfrakcyjnych i przetransmitowanych przez ekran

pomnożonych przez współczynniki edycia fasady b_F , ekranu b_E i podłoża b_A podniesionych do odpowiednich potęg obliczonych na podstawie (6.6), (6.7), (6.8), (6.9), (6.49), (6.50), (6.51), (6.52).

$$\begin{aligned}
 \phi^c(P_0) = & \left[\frac{\cos(ikr_{SP_0})}{r_{SP_0}} + b_F \frac{\cos(ikr_{SP_1})}{r_{SP_1}} + re \phi^d(SQ_0P_0) + \right. \\
 & + b_A re \phi^d(S'Q_0P_0) + b_F re \phi^d(SQ_0P_1) + b_A b_F re \phi^d(S'Q_0P_1) + \\
 & + b_F re \phi^d(SQ_0P_0') + b_A^2 re \phi^d(S'Q_0P_0') + b_A b_F re \phi^d(SQ_0P_1') + \\
 & + b_A^2 b_F re \phi^d(S'Q_0P_1') + b_A b_F^2 b_E re \phi^d(SQ_0P_3) + \\
 & \left. + b_A^2 b_F^2 b_E re \phi^d(S'Q_0P_3) + Ib_A \frac{\cos(ikr_{SP_0}')}{r_{SP_0}'} + Ib_A b_F \frac{\cos(ikr_{SP_1}')}{r_{SP_1}'} \right] + \\
 & + 1 \left[\frac{\sin(ikr_{SP_0})}{r_{SP_0}} + b_F \frac{\sin(ikr_{SP_1})}{r_{SP_1}} + im \phi^d(SQ_0P_0) + \right. \\
 & + b_A im \phi^d(S'Q_0P_0) + b_F im \phi^d(SQ_0P_1) + b_A b_F im \phi^d(S'Q_0P_1) + \\
 & + b_F im \phi^d(SQ_0P_0') + b_A^2 im \phi^d(S'Q_0P_0') + b_A b_F im \phi^d(SQ_0P_1') + \\
 & + b_A^2 b_F im \phi^d(S'Q_0P_1') + b_A b_F^2 b_E im \phi^d(SQ_0P_3) + \\
 & \left. + b_A^2 b_F^2 b_E im \phi^d(S'Q_0P_3) + Ib_A \frac{\sin(ikr_{SP_0}')}{r_{SP_0}'} + Ib_A b_F \frac{\sin(ikr_{SP_1}')}{r_{SP_1}'} \right]
 \end{aligned}$$

6.57

$\phi^c(P_0)$ - potencjał całkowity w punkcie P_0 dla częstotliwości f ($k = 2\pi f/343$) pochodzący od źródła S o mocy jednostkowej.

Współrzędne punktów P_k obliczone na podstawie (3.9) :

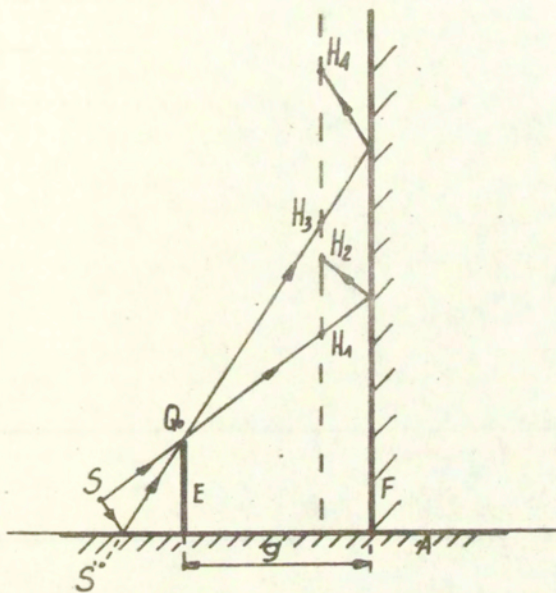
- $P_0 (0,8; 0,8)$,
- $P_0^* (0,8; -0,8)$,
- $P_1 (1,2; 0,8)$,
- $P_1^* (1,2; -0,8)$,
- $P_3 (3,2; 0,8)$,
- $P_3^* (3,2; -0,8)$,

Współrzędne źródła /rys.6.34 + 6.37/:

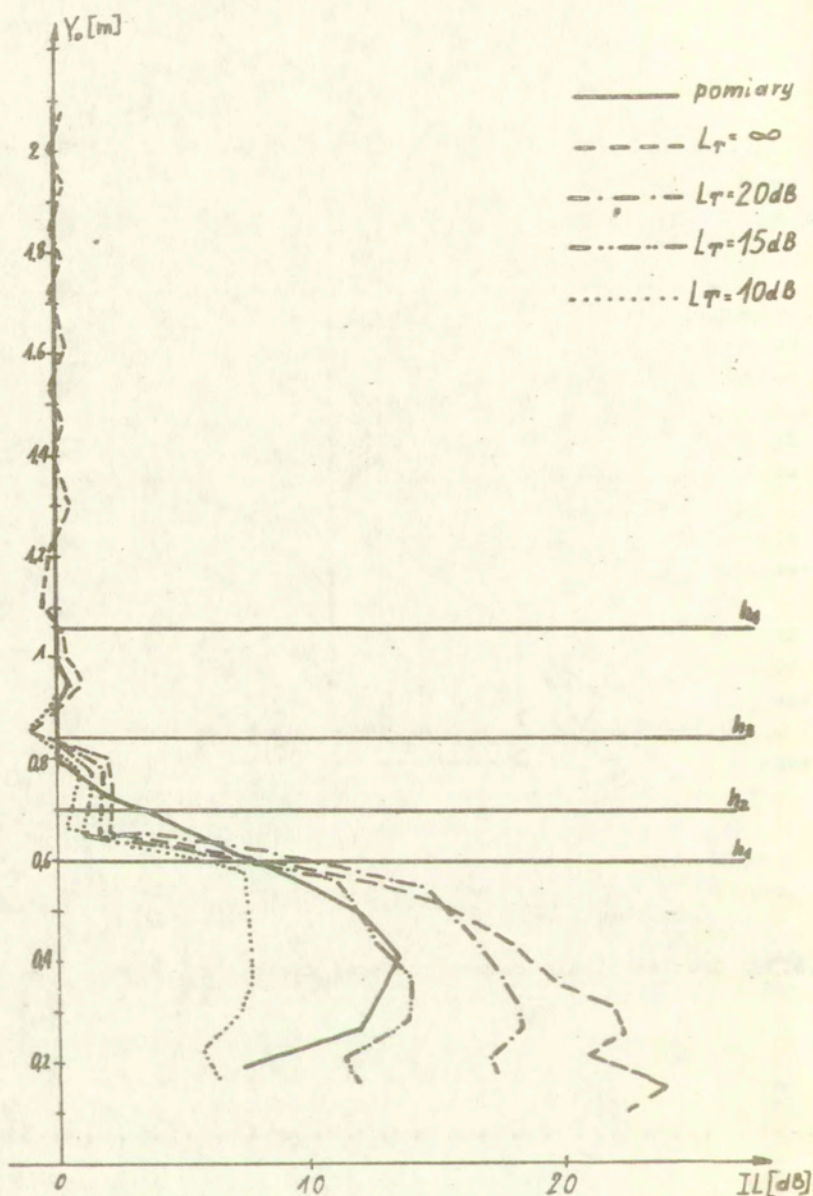
$$S(-1, 0, 15),$$

$$S^*(-1, -0, 15).$$

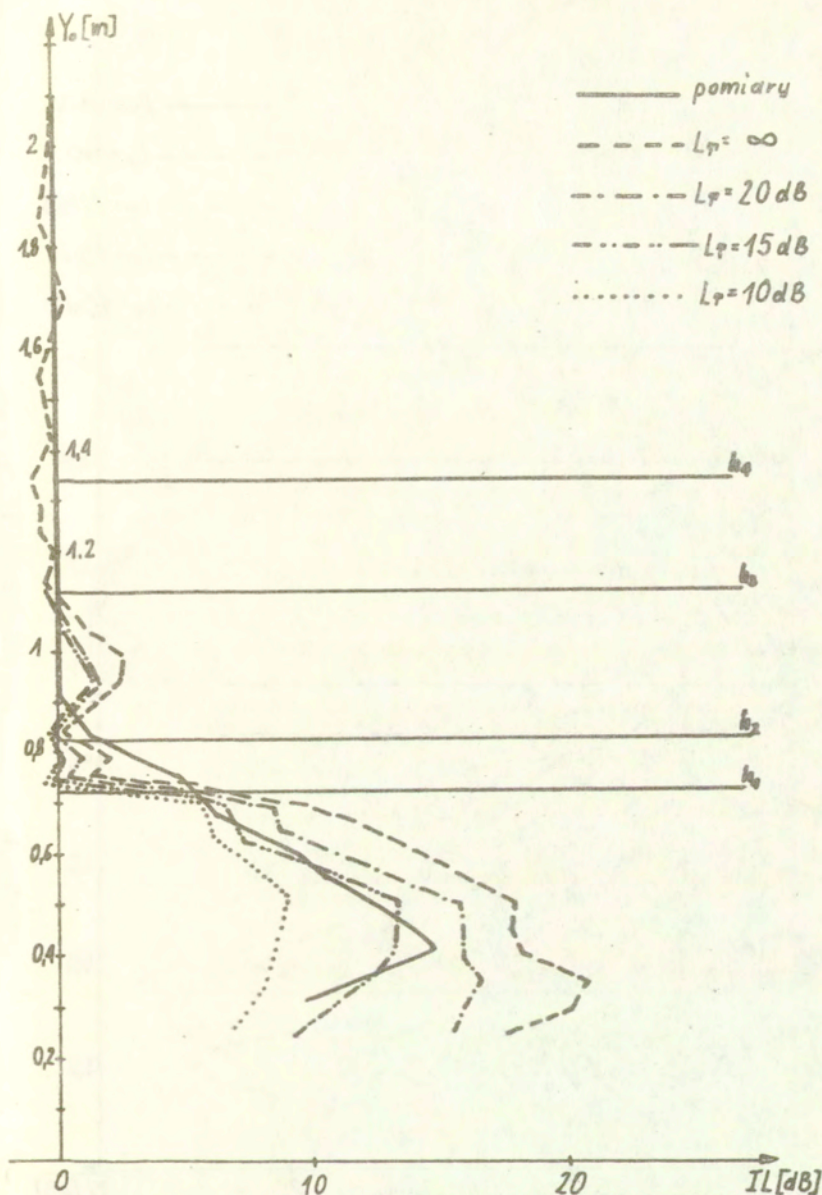
Wykorzystując podaną powyżej metodę obliczona została efektywność ekranowania IL dla pasma oktawowego o częstotliwości środkowej $F_0 = 16$ kHz dla sytuacji pokazanych w rozdziale badania modelowe $\varepsilon = (1, 1,5, 2, 2,5, 3m)$. Izolacyjność ekranu przyjęto równą 10, 15, 20 dB. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach IL = $f(Y_0)$ /efektywność ekranowania IL w funkcji wysokości Y_0 punktu obserwacji P_0 nad podłożem/. Ponadto na wykresach przedstawiono cztery granice cienia geometrycznego: fali bezpośredniej ze źródła S do rzeczywistego punktu obserwacji $P_0 - h_1$, fali ze źródła S dochodzącej do rzeczywistego punktu obserwacji P_0 po odbiciu od fasady F - h_2 , fali ze źródła S dochodzącej do rzeczywistego punktu obserwacji po odbiciu od podłoża A - h_3 , fali ze źródła S dochodzącej do rzeczywistego punktu obserwacji P_0 po odbiciu od podłoża A i fasady F - h_4 /rys.6.38/. Obliczenie wykonano dla ekranu obustronnie odbijającego /rys.6.39 - 6.43/ oraz dla ekranu jednostronnie pochłaniającego od strony fasady /rys.6.44 - 6.48/. Na podstawie przedstawionych wykresów można stwierdzić, że zarówno dla ekranu obustronnie odbijającego jak i jednostronnie pochłaniającego od strony fasady przyjęcie izolacyjności ekranu równej 15 dB spowodowało, że różnica między efektywnością ekranowania uzyskaną w sposób pomiarowy, a efektywnością obliczoną jest mniejsza od 2 dB poza obszarami w pobliżu granic cienia. W pobliżu granic cienia geometrycznego h_1, h_2, h_3, h_4 różnica ta rośnie. Jest to spowodowane faktem, że teoria dyfrakcji Rubinowicza jest słuszna daleko od granicy cienia geometrycznego. Ponadto można stwierdzić, że efektywność ekranowania ekranu płaskiego w dużej mierze decyduje izolacyjność ekranu. Zmiana izolacyjności o 5 dB powoduje zmianę efektywności ekranowania o 3 - 4 dB w obszarze, gdzie dociera do punktu obserwacji P_0 fala bezpośrednia ze źródła S przetransmitowana przez ekran E /poniżej h_1 /.



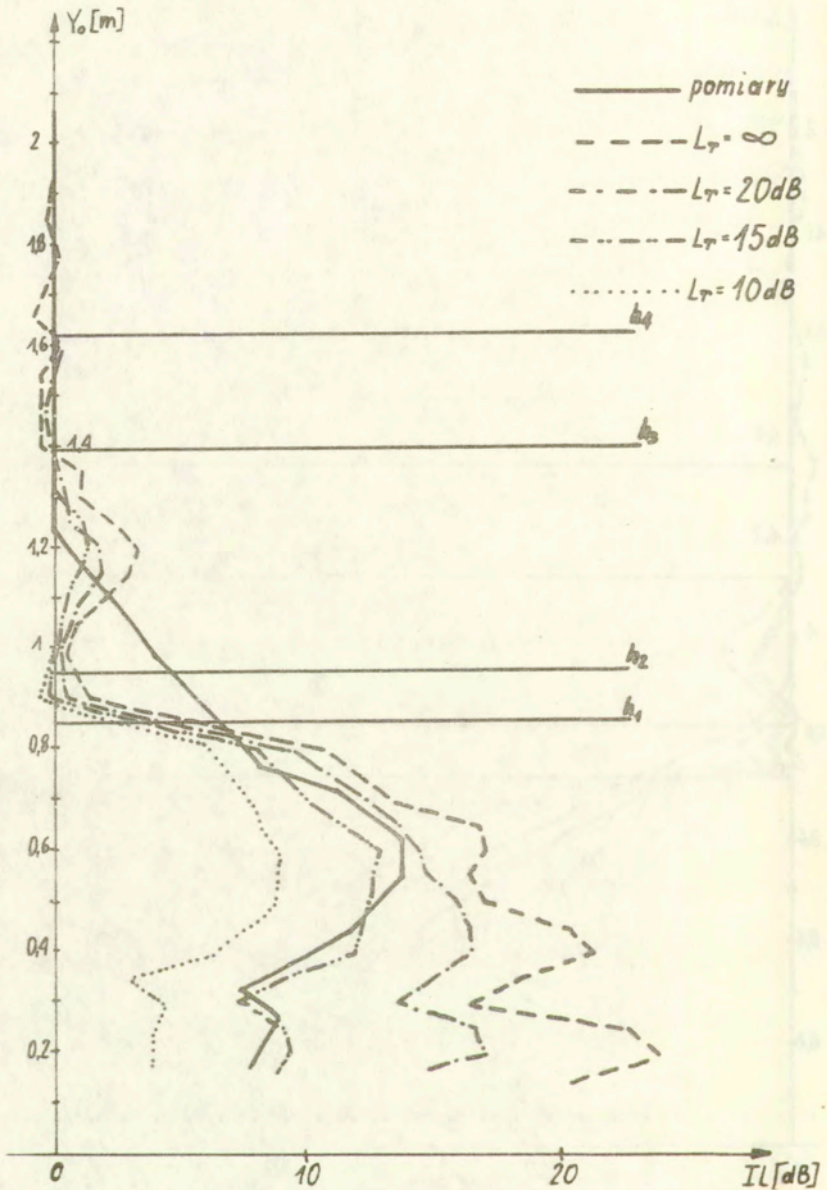
Rys.6.38. Granice cienia geometrycznego h_1, h_2, h_3, h_4 .



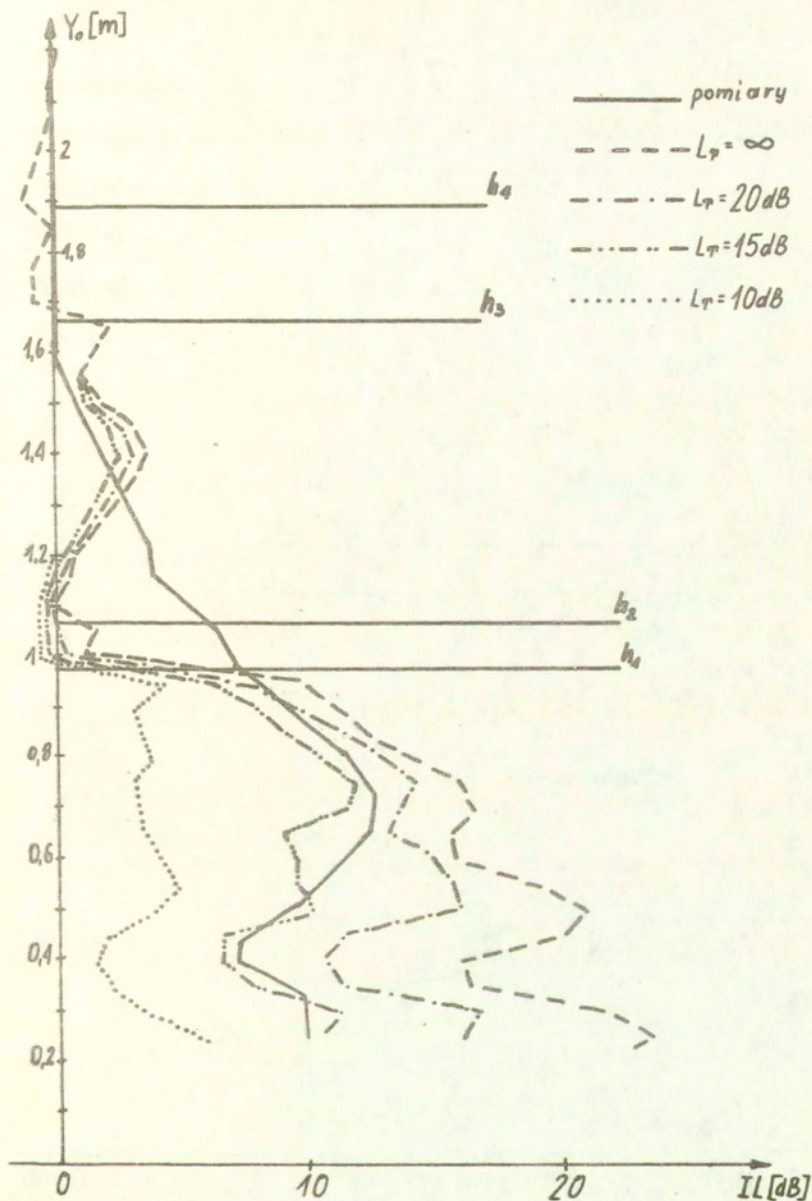
Rys. 6.39 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem. Pomiary - ekran obustronnie odbijający. Obliczenia - bez lub z transmisją przez ekran. Pasma oktawowo o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=1$ m.



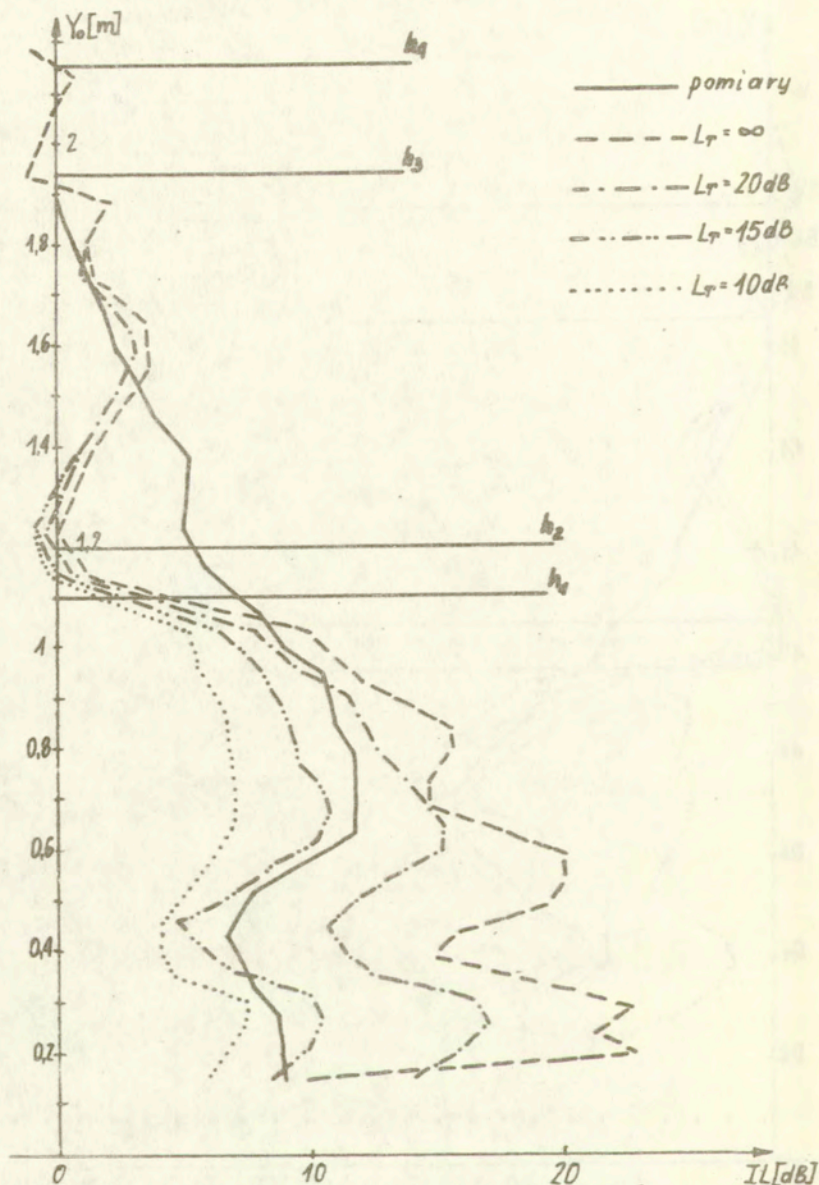
Rys. 6.40 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem. Pomiary - ekran obustronnie odbijający. Obliczenia - bez lub z transmisją przez ekran. Pasmo ośmiodobowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=1.5$ m.



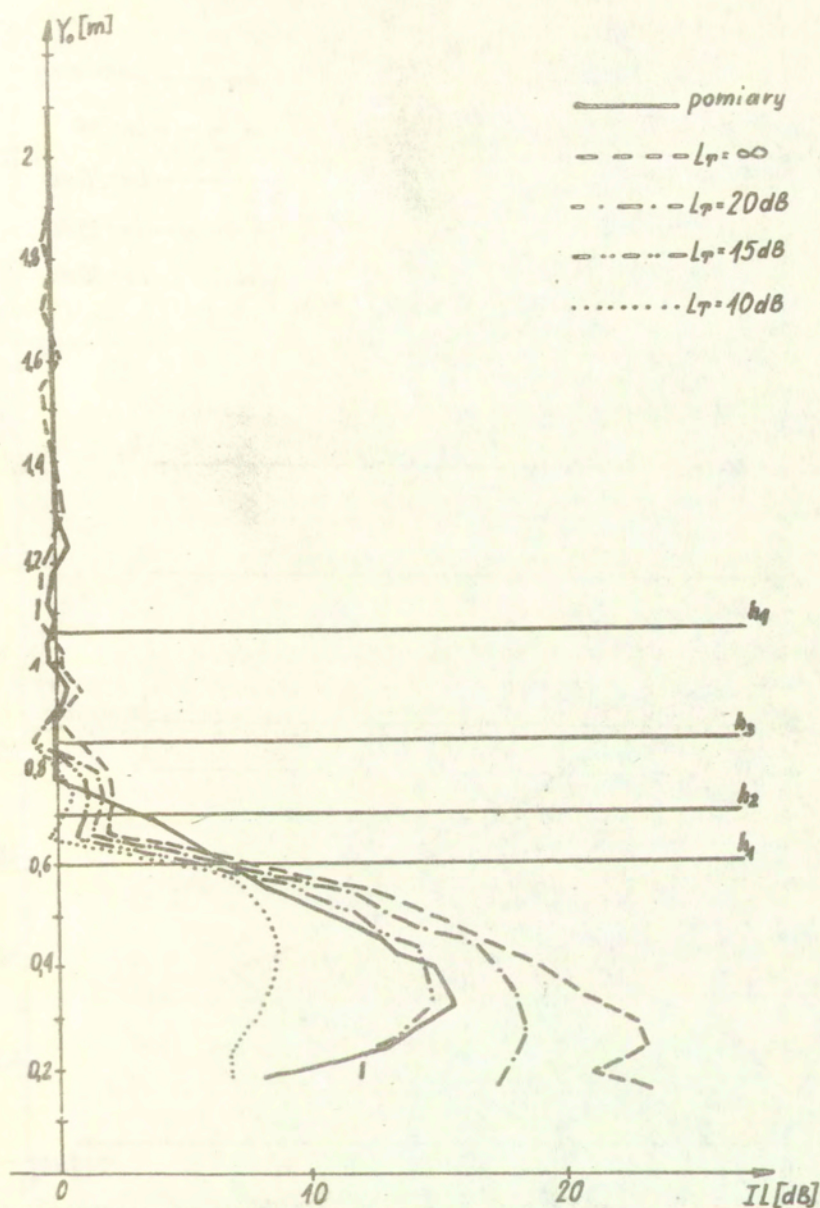
Rys. 6. 41 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem. Pomiary - ekran obustronnie odbijający. Obliczenia - bez lub z transmisją przez ekran. Pasmo ośmowoktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=2\text{ m}$



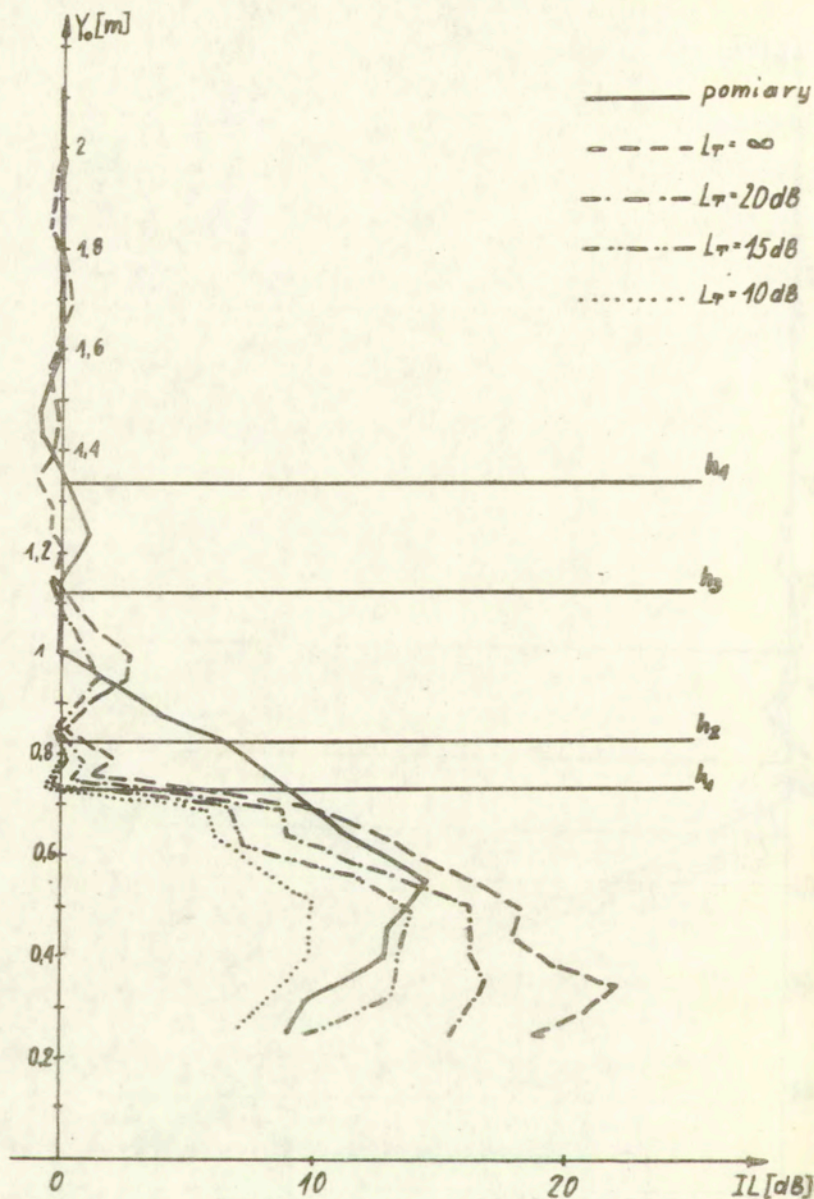
Rys. 6.42 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem. Pomiary - ekran obustronnie odbijający. Obliczenia - bez lub z transmisją przez ekran. Pasmo ośmioktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=2.5$ m.



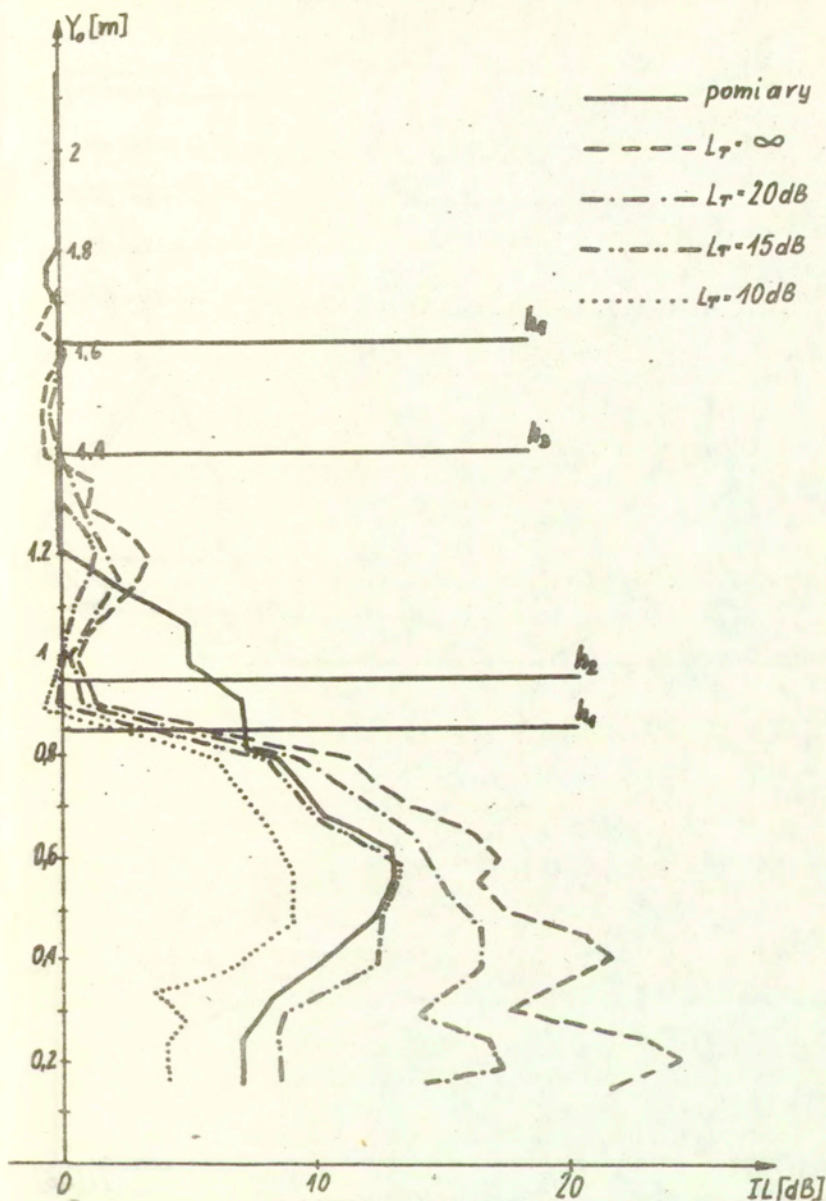
Rys. 6.43 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem. Pomiary - ekran obustronnie odbijający. Obliczenia - bez lub z transmisją przez ekran. Pasmo oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=3$ m.



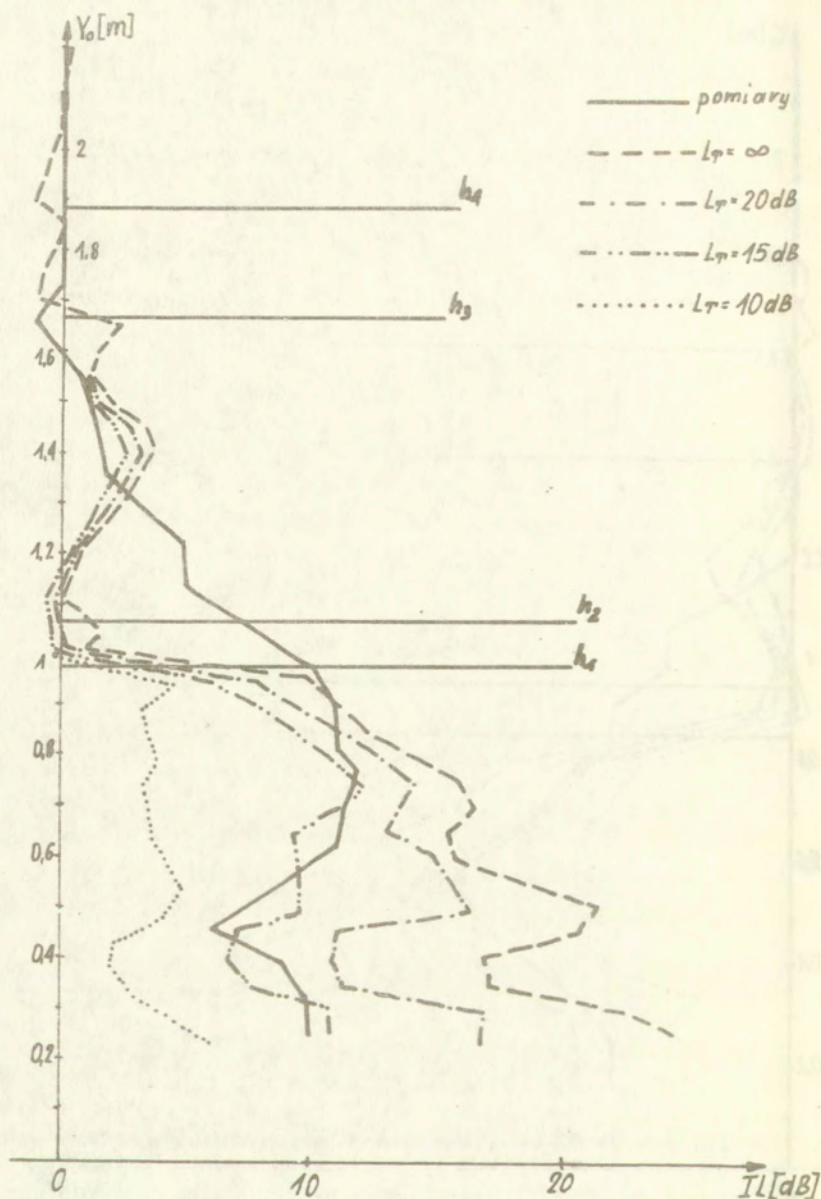
Rys. 5.44 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem. Pomiary - ekran jednostronnie odbijający. Obliczenia - bez lub z transmisją przez ekran. Pasmo oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=1$ m.



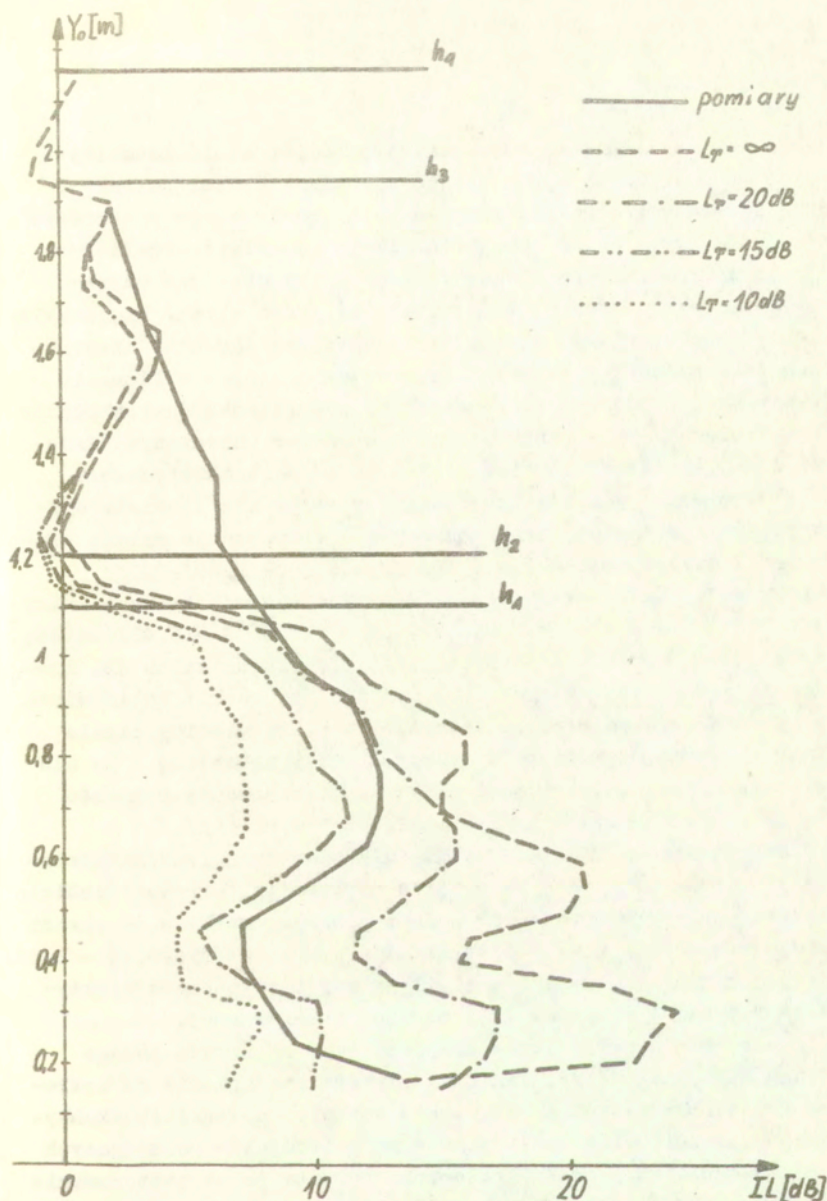
Rys. 6.45 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_o punktu obserwacji nad podłożem. Pomiary - ekran jednostronnie odbijający. Obliczenia - bez lub z transmisją przez ekran. Pasma oktawowo o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=1.5$ m.



Rys. 6.46 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_0 punktu obserwacji nad podłożem. Pomiary - ekran jednostronnie odbijający. Obliczenia - bez lub z transmisją przez ekran. Pasma oktawowe o częstotliwości środkowej 16 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=2\text{ m}$.



Rys. 5.47 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_0 punktu obserwacji nad podłożem. Pomiary - ekran jednostronnie odbijający. Obliczenia - bez lub z transmisją przez ekran. Pasmo oktauwowe o częstotliwości środkowej 15 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=2.5\text{ m}$.



Rys. 6. 48 Zmierzona i obliczona efektywność ekranowania w funkcji wysokości Y_0 punktu obserwacji nad podłożem. Pomiaru - ekran jednostronnie odbijający. Obliczenia - bez lub z transmisją przez ekran. Pasmo ośmiodobowe o częstotliwości środkowej 18 kHz, odległość ekranu od płaszczyzny fasady $g=3$ m.

7. PODSUMOWANIE

Łączne uwzględnienie zjawiska dyfrakcji i odbić geometrycznych od płaszczyzn ograniczających badany obszar pozwala z dobrą zgodnością określić rozkład pola akustycznego w obszarze chronionym przez ekran /obszarze cienia geometrycznego/. Przy obliczaniu rozkładu pola akustycznego w tym obszarze należy uwzględnić przeniesienie /transmitancję/ przez ekran. Nie uwzględnianie tego zjawiska, a więc zakładanie, że ekran ma nieskończoną izolacyjność /jak rebi się powszechnie przy obliczaniu efektywności ekranowania/, prowadzi do popełniania dużych błędów przy określaniu pola akustycznego w obszarze chronionym. Transmisja fal akustycznych przez ekran ma na pole akustyczne w obszarze cienia geometrycznego większy wpływ niż zjawisko dyfrakcji /zmiana izolacyjności ekranu o 5 dB powoduje zmianę efektywności ekranowania o 3 - 5 dB/ /rys.6.39 - 6.48/.

Przy obliczaniu rozkładu pola akustycznego w pobliżu granicy cienia geometrycznego / h_1, h_2, h_3, h_4 - rys.6.39 - 6.48/ metodą przedstawioną w pracy popełniany jest błąd rzędu kilku dB. Spewedowane jest to niezgodnością z założeniami teorii Rubinowicza [16] o oddaleniu od granicy cienia. W pobliżu granicy cienia należy obliczać rozkład pola akustycznego inną metodą - co nie jest celem pracy z uwagi na praktyczne zastosowanie obliczeń /obszar chroniony położony jest "głęboko" w cieniu/.

Przedstawiona metoda nie uwzględnia zjawisk dyfrakcji wielokrotnej - fala ze źródła po ugięciu na krawędzi ekranu i odbiciu od płaszczyzn ograniczających, pada z powrotem na krawędź ekranu i podlega ugięciu. Mimo to, jak widać z wykresów /rys.6.39 - 6.48/ uzyskana została dobra zgodność ilościowa i jakościowa efektywności uzyskanej w sposób obliczeniowy i zmierzonej.

Przedstawiona metoda może być rozwijana na źródła innego rodzaju niż punktowe np. liniowe, poprzez zastąpienie go szeregiem źródeł punktowych i obliczenie wartości potencjału akustycznego w punkcie obserwacji jako suma potencjałów pochodzących od poszczególnych źródeł punktowych. Pozwala to na zastosowanie praktyczne przedstawionej metody dla dużych źródeł np. tramwaju reprezentującego sobą zbiór źródeł punktowych o różnych mocach rozłożonych na płaszczyźnie /boku tramwaju/.

Przy obliczeniach efektywności ekranowania pominięto tłumienie przez ośrodek /powietrze/. Zrobiono tak z uwagi na stosunkowo niewielkie wymiary modelu. Można uwzględnić tłumienie przez ośrodek zarówno fal geometrycznych jak i dyfrakcyjnych mnożąc je przez współczynniki określające spadek amplitudy na drodze przebytej przez falę ze źródła do punktu obserwacji / $\exp(-\alpha r)$ - tłumienie ośrodka w którym propagują się fale/.

8. LITERATURA

1. Baker B.B., Compson E.T. "The mathematical theory of Huygens' principle" Oxford at the Claredon Press, 1950
2. Born M., Wolf E. "Principles of optics" Pergamon Press 1964
3. Goodman J.W. "Introduction to Fourier optics" Mc Graw-Hill 1968
4. Skudrzyk E. "The foundations of acoustics" Springer-Verlag 1971
5. Born M., Wolf E. "Principles of optics, electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light" Pergamon Press 1970
6. Rubinowicz W. "Teoria dyfrakcji Kirchhoffa i jej interpretacja na podstawie poglądów Younga" Ossolineum 1972
7. ed. Bowman J.J., Senior T.B.A., Uslenghi P.L.E. "Electromagnetic and acoustic scattering by simple shapes" North-Holland Com. 1969
8. Rubinowicz A. "Die Beugungswelle in der Kirchhoffschen Theorie der Beugung" PWN Warszaw 1957
9. H.H.McDonald "A class of diffraction problems" Proc.Lond.Math. Soc. 14p 1915. p 410 - 427
10. E.Kotarbińska "Analiza skuteczności działania ekranu przeciwdźwiękowego w pomieszczeniu quasi - płaskim" Praca doktorska Warszawa 1982
11. U.J.Kurze "Noise reduction by barriers" JASA, Vol.55, No 3, 1974
12. Z.Maekawa, K.Fujiwara, N.Nagano 7th ICA - 1971 "Noise reduction by screens of various shapes"
13. Mutsushige Yuzawa "Noise reduction by various shapes of barriers" Inter Noise'75 Sendai Proceedings
14. Z.Maekawa "Environmental sound propagation" ICA 1974 London

15. T.Trajdos - Wróbel "Matematyka dla inżynierów" Wydawnictwo Naukowo - Techniczne Warszawa 1966
16. E.Walerian, R.Janczur "Teorie dyfrakcji stosowane do opisu skuteczności ekranów akustycznych" Prace IPPT 25/1985
17. ~~EETUR~~ "Recommandations techniques pour les ouvrages de protection contre le bruit "Ministere de l'environnement et du cadre de vie - Ministere des transports, 1978, France
18. Kugler B.E., Anderson G.S., Commins D.E., Piersol A.G. "Highway noise propagation and traffic noise model" BBN Report Job. 11700 Bolt Beranek and Newman Inc., 1974

SPIS TREŚCI

1. Wstęp.	str.5
2. Sposoby opisu efektywności ekranów.	str.7
3. Pole akustyczne w obszarze ograniczonym.	str.12
3.1. Opis pola akustycznego.	str.12
3.2. Zjawisko dyfrakcji.	str.13
3.2.1. Teoria dyfrakcji Kirchhoffa.	str.13
3.2.2. Teoria dyfrakcji Kirchhoffa - Rubinowicza.	str.15
3.2.3. Ścisłe rozwiązanie problemu półpłaszczyzny w polu fali kulistej.	str.17
3.2.4. Wnioski.	str.22
4. Zastosowanie teorii Kirchhoffa - Rubinowicza do opisu pola akustycznego w złożonych układach urbanistycznych.	str.23
4.1. Odbicia od dodatkowych płaszczyzn ograniczających obszar.	str.24
4.2. Ekran i dwie dodatkowe płaszczyzny odbijające, podłoże i fasada chronionego budynku.	str.32
4.3. Określenie liczby fal geometrycznych i dyfrakcyjnych docierających do punktu obserwacji.	str.41
4.3.1. Określenie liczby fal geometrycznych.	str.43
4.3.2. Określenie liczby fal dyfrakcyjnych docierających do punktu obserwacji.	str.48
5. Badania modelowe.	str.58
5.1. Zasady odwzorowywania w badaniach modelowych.	str.58
5.2. Metodyka badań modelowych.	str.60
6. Obliczenia numeryczne.	str.65
6.1. Ten e częstotliwości równej środkowi pasma oktawowego i współczynnikach odbicia równych jedności.	str.65
6.1.1. Wnioski.	str.66
6.2. Pasma oktawowe e częstotliwości środkowej 16 kHz i współczynnikach odbicia równych jedności.	str.68

- 6.3. Pasmo oktawowe o częstotliwości środkowej
16 kHz, współczynniki odbicia różne od
jedności. str. 69
- 6.4. Pasmo oktawowe o częstotliwości środkowej
16 kHz, współczynniki odbicia różne od jedności
ekran o skończonej izolacyjności. str. 94
- 6.4.1. Określenie liczby fal przeniesionych
przez ekran decyberających do punktu
obserwacji. str. 100
7. Podsumowanie. str. 132
8. Literatura. str. 133