

Modelowanie emisji i propagacji dźwięku do prognozowania klimatu akustycznego środowiska zurbanizowanego



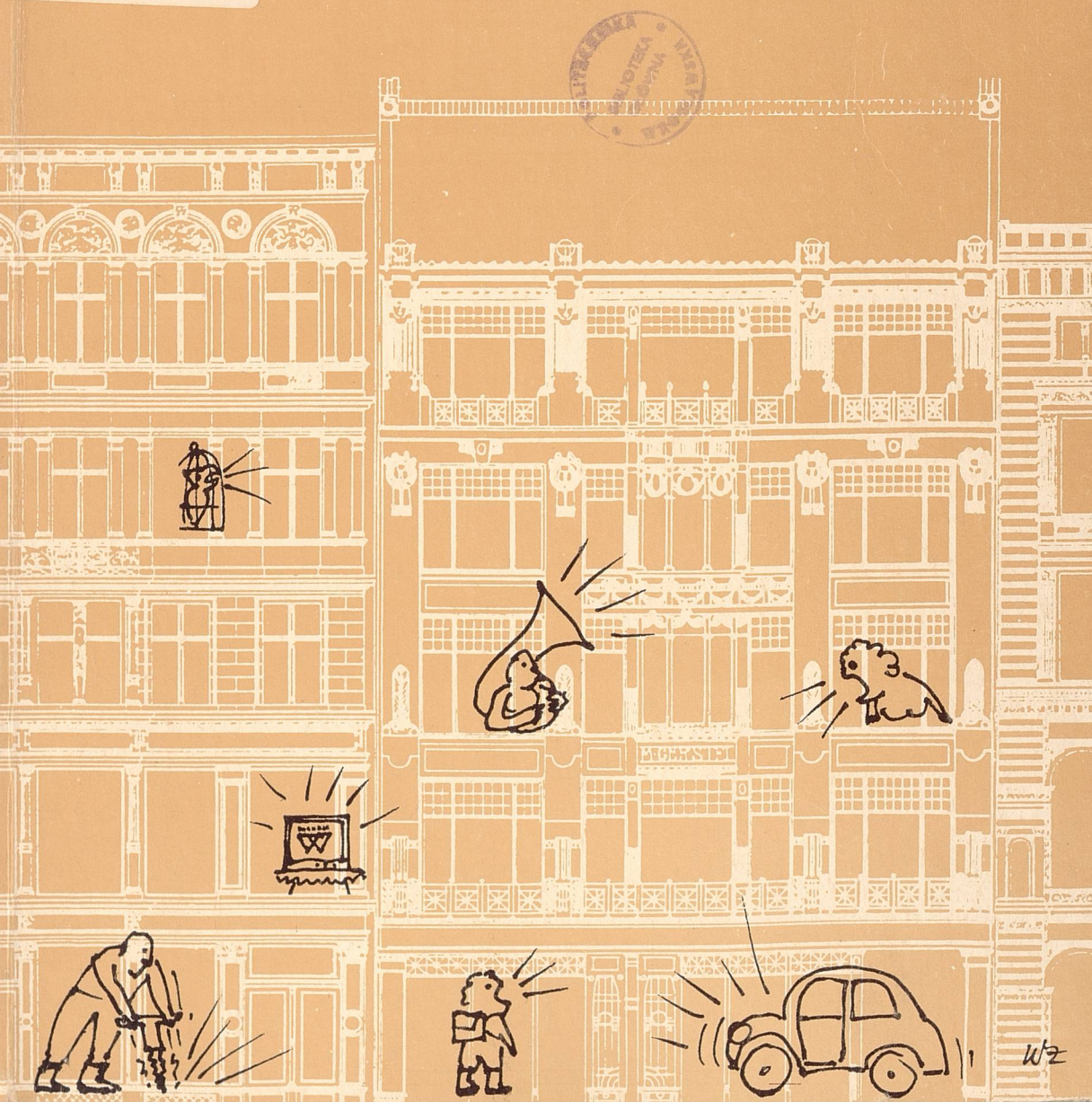
Barbara Rudno-Rudzińska

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

A4137I

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

Monogr. C1 75/39



Barbara RUDNO-RUDZIŃSKA

Modelling sound emission and propagation
for prediction of the accoustic climate in urban environment

Barbara Rudno-Rudzińska

**Modelowanie emisji i propagacji dźwięku
do prognozowania klimatu akustycznego
środowiska zurbanizowanego**



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej • Wrocław 1994

Wydanie publikacji dofinansowane przez Komitet Badań Naukowych

Recenzenci

Rufin MAKAREWICZ

Jerzy SADOWSKI

Opracowanie redakcyjne

Alina KACZAK

Korekta

Urszula BARANOWSKA-SZKOŁA

Zofia JASINA

Barbara WACHOWSKA

Projekt graficzny okładki

Wiesław ZAJĄCZKOWSKI

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ISSN 0324-9328

Nakład 150+50 egz. Ark. wyd. 14,25. Ark druk. 12³/₈. Papier offset. kl. III, 70 g, B1.

Oddano do druku w sierpniu 1994 r. Druk ukończono w sierpniu 1994 r.

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 508/94.

*Klimat akustyczny,
prognozowanie, hałas drogowy,
przestrzeń zurbanizowana*

Barbara RUDNO-RUDZIŃSKA*

MODELOWANIE EMISJI I PROPAGACJI DŹWIĘKU DO PROGNOZOWANIA KLIMATU AKUSTYCZNEGO ŚRODOWISKA ZURBANIZOWANEGO

Praca jest poświęcona zagadnieniom prognozowania parametrów klimatu akustycznego w środowisku zurbanizowanym. Omówiono podstawowe metody modelowania emisji i propagacji dźwięku hałasu środowiskowego wykorzystywane w prognozowaniu klimatu akustycznego. Podano uogólniony matematyczny model emisji dźwięku dla zdefiniowanej klasy powierzchniowych źródeł hałasu środowiskowego, składających się z stacjonarnych oraz ruchomych źródeł składowych. W odniesieniu do hałasu ruchu drogowego, opierając się na wynikach eksperymentalnych badań własnych, ustalono ściśle reguły symulacyjnego modelu prognozującego zbiór parametrów oceny klimatu akustycznego, sformułowano także stacjonarny model prognozujący ekwiwalentny poziom dźwięku L_{AeqT} .

Podano analityczny opis uogólnionego modelu propagacji fali akustycznej w trójwymiarowej przestrzeni ograniczonej, sformułowany na gruncie akustyki geometrycznej, w którym uwzględniono wszystkie, podstawowe zjawiska elementarne: geometryczne rozprzestrzenianie się fali, pochłanianie w ośrodku, odbicie i ugięcie. Włączenia zjawiska ugięcia do geometrycznego modelu pola akustycznego w ograniczonych układach przestrzennych, stanowi istotne rozszerzenie znanych dotychczas modeli geometrycznych, realizowanych numeryczną metodą obrazów pozornych.

Pokazano sposób wykorzystania modeli uogólnionych do prognozowania hałasu ruchu drogowego w przestrzeni zurbanizowanej, a także emisji dźwięku hałasu drogowego z obszaru wielopoziomowych węzłów drogowych.

Przedstawiono przykłady wykorzystania prezentowanych modeli do rozwiązywania zagadnień o charakterze badawczym oraz praktycznych zagadnień projektowych.

Na podstawie weryfikacji eksperymentalnej prezentowanych w pracy modeli oraz analizy porównawczej, poprzedzonej każdorazowo szczegółową analizą błędów, wykazano, że uzyskane dokładności modelowania

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

są wystarczające z punktu widzenia zastosowania tych modeli do prognozowania klimatu akustycznego. Opracowane metody prognozowania powinny znaleźć zastosowanie jako efektywne narzędzia wspomagające projektowanie akustyczne układów i przestrzeni urbanistycznych, a także projektowanie i ocenę skuteczności zabezpieczeń przeciwhałasowych, ocenę jakości akustycznej wnętrz urbanistycznych itp.

W podsumowaniu wskazano dalsze kierunki badań.

Wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń

A_{Ae}	- dodatkowe tłumienie dźwięku,
α	- współczynnik pochłaniania, kąt widzenia,
a_k, b_k	- współczynniki empiryczne modelu hałasu pojazdu samochodowego,
β	- kąt rozwarcia krawędzi uginającej, admitancja,
d	- odległość,
δ_N	- błąd metody numerycznej,
ΔL_e	- skuteczność ekranowania,
ΔL_{Ae}	- skorygowana skuteczność ekranowania,
F_W	- funkcja opisująca zmiany mocy akustycznej źródła elementarnego,
F_p	- funkcja propagacji,
$F(X)$	- całka Fresnela,
φ	- kąt padania fali na płaszczyznę, faza,
ϕ_s, ϕ_r	- kąty określające położenie źródła i odbiornika względem płaszczyzn tworzących krawędź,
G	- funkcja opisująca zmiany położenia źródła elementarnego,
γ_p	- współczynnik przenikalności akustycznej przegrody,
γ	- współczynnik tłumienia,
l_d	- odległość dyfrakcyjna,
L_{def}	- parametr oceny klimatu akustycznego,
L_p	- poziom ciśnienia akustycznego,
L_A	- poziom dźwięku,
L_{AE}	- ekspozycyjny poziom dźwięku,
L_{AM}	- maksymalny poziom dźwięku,
L_{eqT}	- ekwiwalentny poziom ciśnienia akustycznego,
L_{AeqT}	- ekwiwalentny poziom dźwięku,
L_W	- poziom mocy akustycznej,
L_{WA}	- skorygowany poziom mocy akustycznej,
L_{WAeq}	- ekwiwalentny, skorygowany poziom mocy akustycznej,
M	- model matematyczny,
MO_s	- model struktury źródła hałasu środowiskowego,
MS_e	- model hałasu źródła elementarnego,

N_e	- liczba źródeł elementarnych,
$N(\bar{X}, \sigma_x)$	- rozkład normalny o wartości średniej $\bar{X}$ i odchyleniu standardowym σ_x ,
O	- punkt obserwacji, położenie punktu obserwacji,
p	- ciśnienie akustyczne,
p_i	- ciśnienie fali bezpośredniej,
p_r	- ciśnienie fali odbitej,
p_d	- ciśnienie fali dyfrakcyjnej,
$p(x)$	- rozkład zmiennej x ,
p_W	- rozkład mocy akustycznej,
$p(O_s)$	- rozkład położzeń składowych źródeł hałasu,
ψ	- faza, przesunięcie fazowe,
Q	- ciśnieniowy współczynnik odbicia dla fali kulistej lub współczynnik kierunkowości źródła, lub natężenie ruchu,
R_p	- ciśnieniowy współczynnik odbicia dla fali płaskiej,
r_{LV}	- współczynnik korelacji między zmiennymi L i V .
r_t	- funkcja korelacji czasowej,
r_ω	- funkcja uśredniania częstotliwościowego w paśmie $2\Delta\omega$,
S	- elementarne źródło dźwięku, estymator wariancji rozkładu,
$\{S\}$	- zbiór źródeł elementarnych
$\sup\{\circ\}$	- kres górny zbioru $\{\circ\}$,
σ	- efektywna oporność przepływu powierzchni gruntu,
σ_x	- odchylenie standardowe rozkładu zmiennej losowej x ,
τ	- interwał czasu, moment czasu,
t_n	- moment czasu,
Δt	- okres próbkowania, okres czasu,
T	- okres czasu, czas oddziaływania hałasu,
T_o	- transmitancja obiektowa,
T_p	- transmitancja ciśnieniowa,
T_{pi}	- transmitancja ciśnieniowa i -tej trasy promienia dźwiękowego,
T_{pw}	- transmitancja wypadkowa (transmitancja przestrzeni),
T_{ew}	- transmitancja energetyczna,
V	- prędkość ruchu,
W	- moc akustyczna,
W_{eq}	- ekwiwalentna moc akustyczna,
$X_{\pm}$	- parametr opisujący geometrię układu: źródło - krawędź - punkt obserwacji dla bariery cienkiej,
$Y_{r(s)}$	- parametr opisujący geometrię układu: źródło - krawędź - punkt obserwacji dla bariery grubej,
Z	- zespolona impedancja powierzchni gruntu ($Z=R+jX$),
$\{ \}$	- symbol oznaczający zbiór,
$\langle \rangle_N$	- symbol oznaczający uśrednianie w zbiorze N -elementowym,

- $\in$ - znak przynależności do zbioru,
- $\Rightarrow$ - funktor implikacji,
- $\wedge$ - funktor koniunkcji,
- $\vee$ - funktor alternatywy,
- $\forall$ - kwantyfikator,
- $\bigwedge_{S_i \in \{S\}}$ - kwantyfikator ogólny o ograniczonym zakresie,
(czytamy: dla każdego elementu zbioru S)
- $\bigvee_{p(x)}$ - kwantyfikator szczegółowy o ograniczonym zakresie,
(czytamy: dla pewnego x spełniającego formę zdaniową p(x))
- $f: X \Rightarrow Y$ - odwzorowanie zbioru X w zbiór Y,

1. WSTĘP

Problem prognozowania klimatu akustycznego w środowisku zurbanizowanym, jako istotnego aspektu kształtującego warunki życia i pracy człowieka, jest stosunkowo nowy. Pojawił się on równolegle z rozwojem wielkich aglomeracji miejskich i układów urbanistycznych w drugiej połowie naszego wieku. Od stosunkowo prostych narzędzi prognozowania, jakimi były modele empiryczne hałasu ruchu drogowego opisujące spadek średniego poziomu hałasu w funkcji odległości od linii ruchu, do współczesnych symulowanych komputerowo modeli prognozujących rozkład poziomu hałasu w złożonych układach urbanistycznych minęło niespełna 30 lat.

W okresie tym w większości krajów opracowano, mniej lub bardziej kompletne, własne metody prognozowania parametrów oceny hałasu odnoszące się do różnego rodzaju źródeł hałasu środowiskowego: np. komunikacji drogowej, kolejowej, lotniczej, zakładów przemysłowych, uwzględniające w różnym zakresie wpływ charakteru zagospodarowania przestrzeni urbanistycznej na przewidywane parametry klimatu akustycznego. Przegląd stosowanych w akustyce urbanistycznej metod prognozowania znajduje się w [152][161], a także w [1][34][63][106][119].

W Polsce badania w dziedzinie akustyki urbanistycznej prowadzone są w Zakładzie Akustyki Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie [151-162][169-175][195], Instytucie Ochrony Środowiska W Warszawie [46][79], Instytucie Akustyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu [66][67][78][102-113], a także Instytucie Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej [62][64][65][125][135][137][142-144][148-149].

Prezentowane w literaturze metody prognozowania hałasu środowiskowego odznaczają się dużą różnorodnością metodologicznego podejścia, stosowanych technik badawczych oraz zakresu zastosowania. Pomimo istnienia licznych metod prognozowania hałasu, o różnym stopniu złożoności, daje się zauważyć brak kompleksowych metod, które ujmowałyby zarówno czynniki

związane z emisją, jak i propagacją dźwięku w środowisku zurbanizowanym, a przy tym znajdowały zastosowania do rozwiązywania praktycznych zagadnień projektowych. Próbę taką podjęto w niniejszej pracy.

Praca stanowi syntezę wieloletnich badań własnych nad modelowaniem źródeł hałasu środowiskowego [134-137][142-144][146-149] oraz propagacji dźwięku w złożonych konfiguracjach przestrzennych [72][73][138][141][145][146].

1.1. Zarys historyczny i stan badań

Na podstawie analizy rozwoju badań związanych z przewidywaniem klimatu akustycznego w środowisku zurbanizowanym można wyróżnić trzy charakterystyczne etapy, różniące się punktem ciężkości prowadzonych badań.

W etapie I, historycznym, prowadzono głównie badania mające na celu ustalenie zależności między wartością wskaźnika oceny hałasu występującego w punkcie obserwacji a parametrami charakteryzującymi źródło hałasu środowiskowego, bez uwzględnienia wpływu warunków otoczenia. Zakładano zwykle, że źródło hałasu znajduje się na powierzchni idealnie odbijającej. Jako wskaźniki oceny uciążliwości tego hałasu przyjmowano statystyczne poziomy dźwięku L_{A10} (poziom quasimaksymalny) lub L_{A50} (poziom średni) [152].

Pierwsze systematyczne badania w tym zakresie dotyczyły hałasu od komunikacji drogowej, która jest głównym źródłem hałasu środowiskowego na terenach zurbanizowanych. Na podstawie wyników badań empirycznych oraz prostych modeli analitycznych dążono do ustalenia zależności wiążących poziom L_{A50} lub L_{A10} z podstawowymi parametrami charakteryzującymi ruch drogowy: natężeniem ruchu Q i średnią prędkością strumienia pojazdów V [1][25][68][82][152][165].

W Polsce badania na temat kształtowania klimatu akustycznego środowiska i jego ochrony przed hałasem zostały zapoczątkowane już w latach 50. przez Maleckiego¹ oraz Sadowskiego². W latach 1963-1973 prowadzone były szeroko zaprogramowane badania³ ukierunkowane na ocenę źródeł

¹Malecki I., *Wpływ wymogów akustycznych na kształtowanie miasta*, Miasto 1952, r.III, nr 3.

²Sadowski J., Wodziński L., *Akustyka miasta*, Architektura 1955, 12. Sadowski J., Wodziński L., *Lärmbekämpfung in Städten, Lärmbekämpfung* 1959, nr 1-2.

³Temat badawczy FA-7, *Badania nad rozwiązaniem akustyki urbanistycznej na przykładzie miasta Warszawy, Gdańska i Poznania*, ITB Warszawa 1970. W badaniach zaprogramowanych przez Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie uczestniczyli także: Katedra Akustyki UAM w Poznaniu, Katedra Elektroakustyki Politechniki Warszawskiej, Instytut Transportu Samochodowego w Warszawie, Centralny Ośrodek Badań Rozwoju i Techniki Kolejnictwa, Biuro Studiów i Projektów Inżynierii Miejskiej w Warszawie.

hałasu środowiskowego, zwłaszcza od komunikacji drogowej, szynowej i lotniczej. Zgromadzony został bogaty materiał doświadczalny dotyczący poziomów dźwięku oraz charakterystyk widmowych głównych źródeł hałasu środowiskowego. Posłużył on za podstawę do sformułowania wielu zależności empirycznych, np. wiążących parametry ruchu drogowego z parametrami statystycznymi L_{A10} i L_{A50} rozkładu poziomu dźwięku hałasu drogowego, a także określających wpływ rozwiązań urbanistycznych na poziom tego dźwięku. Syntetyczne wyniki tych badań oraz bogaty wykaz publikacji i materiałów źródłowych znajdują się w publikacjach książkowych [152] [157], a także w [151].

W etapie II, obserwuje się szybki postęp badań w dziedzinie akustyki urbanistycznej, zarówno w badaniach podstawowych, jak też w zakresie nauk stosowanych i badań empirycznych. Złożoność problemów związanych z emisją dźwięku i jego propagacją w rzeczywistych sytuacjach urbanistycznych, a także wyraźnie odrębny charakter tych zjawisk, spowodowały wykształcenie się równoległych nurtów badawczych:

1. Badania empiryczne związane z emisją dźwięku przez źródła hałasu środowiskowego mające na celu ustalenie ich charakterystyk⁴ [1][63][85] [136][161], a także sformułowanie wiarygodnych, analitycznych modeli emisji hałasu dla różnych rodzajów źródeł, np. komunikacji drogowej [1] [46][63][102][119][138], kolejowej⁵ [34][119][46], lotniczej [126]. Za charakterystyki akustyczne źródeł hałasu przyjmowano zwykle poziom dźwięku lub charakterystykę widmową hałasu występującego w warunkach przestrzeni otwartej, w standardowo ustalonym punkcie obserwacji zwanym punktem odniesienia (np. w odległości $d_0 = 1$ m lub $d_0 = 10$ m od krawężnika jezdni) [1][161]. W najnowszych pracach przeważa tendencja do charakteryzowania źródeł hałasu środowiskowego poprzez moc akustyczną równoważną emisji dźwięku do otoczenia [56][125][65][181].

2. Badania dotyczące poznania praw rządzących propagacją dźwięku w obszarze zurbanizowanym. Prowadzone równoległe prace (teoretyczne, eksperymentalne i modelowe) nad propagacją fali akustycznej w środowisku zewnętrznym doprowadziły do stosunkowo dobrego poznania charakteru podstawowych zjawisk elementarnych, takich jak: pochłanianie w powietrzu [124], propagacja fali akustycznej nad powierzchnią gruntu [2][5][16] [17][29][30][37][38][161][151][179][184] oraz dyfrakcja na nieskończenie

⁴Także: Kucharski R., *Badania w zakresie hałasu drogowego i kolejowego*. Program badawczy PR-5, ITB Warszawa 1975.

⁵Przegląd metod prognozowania hałasu drogowego, i kolejowego zawiera rozprawa doktorska R.Kucharskiego pt. *Prognozowanie parametrów klimatu akustycznego mieszkań w funkcji charakterystyk terenu i źródeł hałasu*, ITB Warszawa 1990.

długiej krawędzi (patrz rozdz. 6.1). Wyznaczone także zostały empiryczne wartości parametrów akustycznych opisujących stan środowiska zurbanizowanego, takie jak: współczynnik pochłaniania w powietrzu⁶ w funkcji temperatury oraz wilgotności powietrza [63][124], czy efektywna oporność przepływu dla typowych powierzchni gruntu [30][31][53].

Opracowano także wiele wykresów i nomogramów pozwalających w sposób przybliżony oszacować wpływ poszczególnych zjawisk w typowych sytuacjach urbanistycznych; np. efekt ekranowania przez bariery, budynki i nasypy ziemne [32][101][161], wzrost poziomu hałasu w wyniku odbić od fasad budynków dla różnego typu zabudowy [161][175], tłumienie dźwięku przez pasy zieleni [161] itp.

Wraz z postępem wiedzy na temat praw rządzących rozchodzeniem się dźwięku w środowisku zewnętrznym, rozbudowywano wcześniej sformułowane modele źródeł hałasu o czynniki związane z wpływem otoczenia. W odniesieniu do hałasu komunikacji drogowej przykładem mogą być metody przedstawione w [102][105][108][192], w których rozwiązania problemu propagacji dźwięku w obszarze zabudowanym poszukuje się na drodze rozwiązań analitycznych oraz w [20][27][72][138], w których zastosowano symulację komputerową.

W Polsce prace teoretyczno-eksperymentalne nad rozchodzeniem się dźwięku w obszarze zurbanizowanym prowadzone były⁷ w Zakładzie Akustyki Instytutu Techniki Budowlanej (ZA ITB) (w latach 1975-79) we współpracy z Instytutem Podstawowych Problemów Techniki PAN i Instytutem⁸ Akustyki.⁹ Uniwersytetu im. A.Mickiewicza w Poznaniu (IA UAM). Obejmowały one badania właściwości akustycznych elementów urbanistycznych¹⁰ oraz wpływu rozwiązań urbanistycznych na poziom dźwięku hałasu drogowego. Ustalone w rezultacie tych badań zasady projektowania akustycznego w urbanistyce oraz prawidłowego kształtowania klimatu akustycznego na terenach zabudo-

⁶Wartości współczynników absorpcji w powietrzu podają normy: ANSI S126 - *Method for calculation of the absorption of sound by the Atmosphere*, VDI 2714 - *Schallausbreitung in Freien*.

⁷Prace badawcze w ramach Programu Rządowego PR-5 pod kierunkiem prof. J.Sadowskiego.

⁸Dawniej: Katedra Akustyki.

⁹Badania modelowe i terenowe różnych układów urbanistycznych. Prace KA UAM/ITB, Warszawa 1980.

¹⁰Badania teoretyczne i terenowe ekranów urbanistycznych naturalnych i sztucznych do ochrony budynków przed hałasem komunikacyjnym. (pod kierunkiem prof. S.Czarneckiego), IPPT PAN/ITB, Warszawa 1980.

Opracowanie metody projektowania i obliczania naturalnych i sztucznych ekranów urbanistycznych (pod kierunkiem prof. S.Czarneckiego), IPPT PAN/ITB, Warszawa 1979.

wanych¹¹ znajdują się m.innymi w [151][154][158][161] i [175]. Badania prowadzone w Instytucie Techniki Budowlanej zaowocowały także opracowaniem metodologii sporządzania planów akustycznych, które służą do identyfikacji źródeł hałasu lub charakteryzują klimat akustyczny na wybranym terenie [155][156][161][162]. W Instytucie Akustyki Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu prowadzono prace nad analitycznym rozwiązaniem problemu przewidywania parametrów charakteryzujących hałas drogowy w warunkach przestrzeni otwartej [66][67][102][104], a także w przestrzeni zabudowanej [106][109][110]. Problem symulacyjnego modelowania hałasu ruchu drogowego w złożonej strukturze urbanistycznej był przedmiotem prac prowadzonych w Instytucie Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej [72][138]. W latach 1985-1990 prowadzono kompleksowe badania¹², w wyniku których opracowano zestaw metod prognozowania hałasu obejmujący: metodę określania zasięgu hałasów przemysłowych [195], metodę określania hałasów lotniczych [19], metodę prognozowania hałasów w otoczeniu dużych źródeł powierzchniowych [65] oraz zunifikowane metody obliczeniowe własności akustycznych elementów urbanistycznych [111].

W etapie III, *współczesnym*, za główne kierunki badań należy uznać uzyskanie kompleksowych, zweryfikowanych empirycznie metod prognozowania, uwzględniających dużą liczbę czynników charakteryzujących zarówno źródło hałasu, jak i warunki propagacji, które umożliwić będą przewidywanie rozkładu poziomego dźwięku hałasu środowiskowego w obszarach zurbanizowanych. Przykładem badań idących w tym kierunku mogą być prace [138][181][195].

Współczesne wysoce efektywne środki techniki numerycznej, pozwalają na formułowanie i konstruowanie modeli prognostycznych o dużym stopniu złożoności. Problemem jest tu często brak empirycznych wartości parametrów występujących w wykorzystywanych teoretycznych modelach zjawisk akustycznych. Dlatego też szczególnej wagi nabiera w tym przypadku problem analizy błędu oraz empirycznej weryfikacji formułowanych modeli.

Uwzględniając postępy badań należy przewidywać w niedalekiej przyszłości rozszerzenie metod prognozowania hałasu środowiskowego o wpływ czynników związanych z warunkami atmosferycznymi, takich jak referakcja w wyniku gradientu temperatury ośrodka i gradientu prędkości wiatru [40][45][47][87][88][89][181].

¹¹W wykazie prac teoretycznych i doświadczalnych, które ukazały się w latach 1971-1982, zamieszczonym w Archiwum Akustyki 1988, 19, (1/2), prace związane z omawianą problematyką (Dział III), zajmują m.in. pozycje: [377]-[390] [557][558][564][565][567-571] oraz [596][597][600-611].

¹²Tematy badawcze w ramach CPBR 11.4 *Ochrona środowiska przed hałasem i drganiami* pod kierunkiem prof. J. Sadowskiego.

1.2. Cel pracy

Z przytoczonych w poprzednim rozdziale tendencji w modelowaniu i prognozowaniu hałasu środowiskowego oraz na podstawie podanej literatury można sformułować następujące wnioski:

1. Prezentowane w literaturze modele źródeł hałasu środowiskowego odnoszą się do źródeł, które ze względu na charakter emisji dźwięku można sklasyfikować jako [161]:

- grupowe ze stacjonarnymi źródłami składowymi, np. zakłady przemysłowe [168][195].

- liniowe o nieskończonej długości lub liniowe o skończonej długości, np. ruch drogowy czy kolejowy [79][157],

- grupowe z ruchomymi źródłami składowymi, przemieszczającymi się w sposób zorganizowany, np. ruch drogowy [137], ruch lotniczy [19].

Identyfikacja oraz wyznaczenie charakterystyk akustycznych powierzchniowych źródeł hałasu środowiskowego, na których występuje wiele składowych stacjonarnych lub ruchomych źródeł elementarnych (w tym przypadku emitowany hałas jest ciągiem zdarzeń dźwiękowych o zmiennej strukturze czasowo-przestrzennej) napotykała dotychczas istotne problemy metodologiczne. W literaturze przedmiotu brak jest szerszego opracowania tego zagadnienia¹³.

2. Metody prognozowania hałasu środowiskowego, w których uwzględniono warunki propagacji dźwięku w obszarze zabudowanym, cechuje duży stopień uproszczenia. Wpływ poszczególnych zjawisk związanych z propagacją dźwięku ujmowany jest zwykle w formie odpowiednich poprawek, określających dodatkowe tłumienie ΔL_A dźwięku w wyniku np. pochłaniania w powietrzu, przez powierzchnię gruntu, zieleni, odbicia i ekranowanie, w stosunku do propagacji dźwięku w warunkach przestrzeni swobodnej [79][161][181][195].

Modele analityczne hałasu w obszarze zurbanizowanym wymagają przyjęcia wielu założeń upraszczających, co w konsekwencji ogranicza zakres ich zastosowania. Przykładem może być model Makarewicza [108], w którym uwzględniono tylko efekt ekranowania przez budynki, pomijając wpływ ugięć na narożach budynków oraz odbicia od fasad budynków.

Stosunkowo dokładną prognozę co do rozkładu poziomu dźwięku hałasu w środowisku uzyskuje się stosując technikę modelowania w skali [78][161]. Jednak ze względu na problemy techniczne związane z budową modeli, w których odwzorowane byłyby wszystkie zjawiska akustyczne, uwzględniając przy tym koszty budowy tych modeli; technikę tę trudno

¹³ Problem modelowania hałasu emitowanego z obszaru dużych źródeł powierzchniowych był przedmiotem badań realizowanych pod kierunkiem autorki w latach 1985-1990 w Instytucie Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej w ramach CPBR 11.4, kierunek III [65][142].

zaliczyć do metod powszechnego stosowania. Badania akustyczne na modelach w skali, wykonywane w specjalnie wyposażonych ośrodkach badawczych, mają na ogół charakter jakościowy lub dotyczą złożonych układów urbanistycznych o dużym stopniu zagrożenia hałasem [161][175][164].

Przez wiele lat trudności związane z analizą tras promieni dźwiękowych w złożonych układach przestrzennych były powodem ograniczonego zastosowania modeli numerycznych, które opierały się na regułach akustyki geometrycznej [97][161][151]. Technikę numerycznego modelowania pola akustycznego metodami geometrycznymi rozwijano z myślą o pomieszczeniach przeznaczonych do transmisji mowy i muzyki, takich jak: sale koncertowe, teatry czy studia nagrań [80][170], w których wypadkowe ciśnienie jest superpozycją ciśnienia fali bezpośredniej i fal odbitych od powierzchni ograniczającej pomieszczenie. W przypadku analizy pola akustycznego w obszarze zurbanizowanym pominięcie zjawiska dyfrakcji nie znajduje wystarczającego uzasadnienia. Problem włączenia zjawiska dyfrakcji do geometrycznego modelu pola akustycznego w przestrzeni ograniczonej nie został do tej pory rozwiązany, chociaż samo zjawisko dyfrakcji ma bogatą literaturę (patrz rozdz.6.1).

Poznanie praw rządzących propagacją fali akustycznej, a także możliwości gromadzenia i przetwarzania dużej liczby danych, jakie stwarza nowoczesna technika cyfrowa, stanowią dobrą podstawę do podjęcia prac nad skonstruowaniem geometrycznego modelu propagacji dźwięku w obszarze zurbanizowanym.

Rozwiązanie wymienionych problemów, jako niezbędny krok do sformułowania kompleksowej metody prognozowania hałasu środowiskowego w obszarze zurbanizowanym, postawiono za cel niniejszej pracy.

W związku z tym za szczególne cele pracy uznano:

- podanie uogólnionego modelu źródła hałasu środowiskowego oraz reguł definiujących moc akustyczną źródeł elementarnych opartych na mierzalnych (fizycznych) wielkościach oraz/(lub) parametrach charakteryzujących obiekt, który rozpatrywany jest jako źródło hałasu środowiskowego,

- podanie geometrycznego modelu pola akustycznego w przestrzeni zurbanizowanej z uwzględnieniem podstawowych zjawisk elementarnych związanych z propagacją fali akustycznej: geometrycznego rozprzestrzeniania się, pochłaniania w ośrodku, odbicia i ugięcia,

- przeprowadzenie analizy błędów oraz empiryczne zweryfikowanie zaproponowanych modeli teoretycznych w zastosowaniu do prognozowania hałasu drogowego (ocena przydatności i wartości poznawczych modelu teoretycznego jest jednym z ważniejszych zagadnień w naukach stosowanych).

Zakładając dalszy rozwój techniki cyfrowej oraz powszechną dostępność do systemów komputerowych przyjęto modelowanie teoretyczne

emisji i propagacji dźwięku, które jest realizowane metodami symulacji komputerowej, jako podstawową technikę modelowania.

W dalszych rozdziałach pracy przedstawiono nie tylko uogólnione oraz szczegółowe wersje modeli emisji oraz propagacji hałasu, ale szkicując ich ewolucję, pokazano cały zespół problemów, które należało rozwiązać, aby te modele uzyskać. Większość z wyodrębnionych problemów poruszonych w pracy, zaopatrzone w odpowiedni zestaw pojęć i definicji, wraz z krótkim przeglądem aktualnych dokonań w tej dziedzinie prezentowanych w literaturze.

1.3. Układ pracy

Praca składa się z 8 rozdziałów i wykazu literatury.

Rozdział 1 (wstęp) i 2 stanowią wprowadzenie w ogólne zagadnienia związane z prognozowaniem hałasu środowiskowego. W rozdziale wstępnym podano skrótowy przegląd dotychczasowych metod i tendencji w prognozowaniu hałasu środowiskowego. W rozdziale tym sformułowano także podstawowe cele i założenia pracy. W rozdziale 2 podano charakterystyki i zakres zastosowania podstawowych metod teoretycznego modelowania źródeł hałasu oraz propagacji dźwięku w obszarach zurbanizowanych¹⁴.

W rozdziałach 3 i 6 przedstawiono koncepcję oraz zasady formułowania symulacyjnych i zastępczych modeli złożonych źródeł hałasu środowiskowego (rozd.3) oraz podano geometryczny model propagacji dźwięku w dowolnym ograniczonym (trójwymiarowym) układzie przestrzennym (rozd.6), w którym parametry pola akustycznego wyznacza się metodą obrazów¹⁵ pozornych.

W rozdziałach 4 i 5 pokazano sposób zastosowania uogólnionego modelu źródła hałasu środowiskowego (wprowadzonego w rozdz.3) w symulacyjnym modelowaniu hałasu strumienia pojazdów samochodowych (rozd.4) oraz w zastępczym, stacjonarnym modelu hałasu drogowego (rozd.5). Podano wyniki weryfikacji empirycznej modeli oraz analizy błędu metody.

W rozdziałach 7 i 8 zaprezentowano sposób wykorzystania opracowanych modeli źródła hałasu drogowego (rozd.3-5) i propagacji dźwięku w przestrzeni ograniczonej (rozd.6) do prognozowania hałasu drogowego występującego w obszarze zurbanizowanym (rozd.7) oraz w otoczeniu źródła

¹⁴Ze względu na ograniczoną objętość pracy omówienie metod modelowania ograniczono do modeli matematycznych, wiążących się bezpośrednio z problematyką niniejszej pracy.

¹⁵Metodę numeryczną, która została zastosowana do realizacji modelu propagacji, nazwano metodą obrazów pozornych gdyż występują w niej zarówno źródła pozorne (model odbicia), jak i krawędzie pozorne (model ugięcia) (rozd.6) [73].

hałasu środowiskowego o złożonej strukturze przestrzennej (wielopoziomowe węzły drogowe - rozdz.8). Przedstawiono wyniki analizy błędu, weryfikacji empirycznej opracowanej metody prognozowania, wyniki analizy porównawczej z innymi metodami modelowania, a także przykłady wykorzystania modelu w rozwiązywaniu zagadnień o charakterze poznawczym oraz w projektowaniu akustycznym.

Wyniki prac własnych autora znajdują się we wszystkich merytorycznych rozdziałach pracy. Za szczególne osiągnięcie należy uznać włączenia do geometrycznego modelu pola akustycznego w ograniczonych układach przestrzennych zjawiska ugięcia, co stanowi istotne rozszerzenie istniejących dotychczas modeli geometrycznych.

Pragnę tu podziękować przede wszystkim zespołowi, z którym przez wiele lat wspólnie pracowałam w Instytucie Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej. Bez współpracy i współdokonań członków tego zespołu niniejsza praca w swoim obecnym kształcie nie mogłaby powstać. Szczególnie cenny wkład do komputerowej realizacji kolejnych wersji modeli wniósł dr inż. Jerzy Jurkiewicz. Dzięki jego współpracy możliwe było uzyskanie efektywnych modeli numerycznych wykorzystywanych w eksperymentach symulacyjnych.

Podejmując i realizując problem prognozowania hałasu środowiskowego, spotkałam się ze szczególną zyczliwością i poparciem prof. dra hab. inż. Jerzego Sadowskiego, który inspirował i wspierał wiele moich prac badawczych. Słowa podziękowania kieruję także do prof. dra hab. Rufina Makarewicza za krytyczne uwagi, które przyczyniły się do pogłębienia mojej wiedzy o zagadnieniach przedstawionych w niniejszej pracy. Panu prof. drowi hab.inż. Adamowi Lipowczanowi wyrażam głęboką wdzięczność za pomoc w trakcie pisania pracy, a także za słowa otuchy i wiary w sens jej kontynuacji.

Osobno pragnę podziękować drowi inż. Wojciechowi Myśleckiemu, który wprawdzie nie jest formalnie związany z obszarem badawczym objętym pracą, niemniej jednak jego cenne uwagi, dotyczące strukturalnych aspektów formułowania modeli, stanowią istotny wkład w jego ostateczną formę.

2. METODY MODELOWANIA W AKUSTYCE URBANISTYCZNEJ

2.1. Wprowadzenie

Modelowanie polega na zastąpieniu konkretnego układu badanego przez inny, podobny do niego model, z uwzględnieniem w nim istotnych cech mających wpływ na badane zjawiska. W akustyce urbanistycznej stosuje się dwie¹⁶ podstawowe metody modelowania: modelowanie na makietach w skali oraz modelowanie teoretyczne. Pomiary modeli fizycznych budowanych w pomniejszonej skali były jedną z najwcześniejszych metod modelowania akustycznego, jednak wraz z rozwojem techniki cyfrowej coraz powszechniejsze zastosowanie znajdują modele matematyczne.

Istotą techniki modelowania w skali jest zastąpienie badań zjawisk zachodzących w rzeczywistych układach, badaniami odpowiednich wielkości w fizycznych modelach tych układów. Podstawowym parametrem charakteryzującym model jest jego skala, zdefiniowana przez stosunek wymiarów liniowych modelu i jego wzorca. Warunkiem koniecznym równoważności zjawisk akustycznych występujących w modelu i w rzeczywistości jest odpowiednie skalowanie wszystkich wielkości akustycznych: współczynników pochłaniania powierzchni granicznych, współczynnika pochłaniania w ośrodku oraz charakterystyki widmowej modelowego źródła dźwięku. Dla modelu wykonanego np. w skali 1:10 zakresowi częstotliwości akustycznych 20-10000 Hz odpowiada zakres 0,2-100 kHz, a w skali 1:100 odpowiednio 2-200 kHz. Pociąga to za sobą konieczność stosowania źródeł ultradźwiękowych, zwłaszcza w przypadku modelowania sytuacji urbanistycznych, w których istotne znaczenie ma zjawisko dyfrakcji. Szersze naświetlenie tego zagadnienia znajduje się w pracach [78][161][152][157].

Technika modelowania w skali znajduje zastosowanie w badaniach układów urbanistycznych, gdzie warunki graniczne są często zbyt skomplikowane aby opisać je dokładnie w sposób matematyczny. Przykładem mogą być tu badania hałasu ruchu drogowego oraz skuteczności zabezpieczeń akustycznych dla projektowanej Trasy Łazienkowskiej, wykonane we współpracy ITB-CSTB w Grenoble [161][170][175]. W Japonii modelowanie w skali jest szeroko stosowane do przewidywania uciążliwości hałasu występującego w otoczeniu złożonych wielopoziomowych węzłów drogowych [188].

W Polsce badania modelowe w zakresie akustyki urbanistycznej prowadzone były w Instytucie Techniki Budowlanej z wykorzystaniem źródła a-

¹⁶W rozważaniach pominięto modele empiryczne. Modele te, będące uogólnieniem wyników wielu obserwacji rzeczywistych sytuacji urbanistycznych, obowiązują tylko dla sytuacji podobnych do badanych, co w istotny sposób ogranicza ich zakres zastosowania.

kustycznego [161] [175] oraz w Instytucie Akustyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza z zastosowaniem źródła optycznego¹⁷ [78]. Ze względu na stosowane w badaniach modelowych źródła dźwięku żadna z metod nie odwzorowuje zjawiska dyfrakcji.

Model matematyczny, w odróżnieniu od realnego modelu w skali, jest modelem *nominalnym*¹⁸, czyli zbiorem założeń przyjętych w celu rozwiązania danego problemu badawczego. Makarewicz w pracy [106] definiuje model matematyczny hałasu jako formę przyporządkowania zbiorowi parametrów wejściowych, charakteryzujących źródło dźwięku oraz przestrzeń propagacji, odpowiedniego zbioru parametrów wyjściowych, które określają wskaźniki oceny hałasu. Charakterystyki oraz zakres obowiązywania modeli teoretycznych stosowanych w akustyce urbanistycznej przedstawiono w niniejszym rozdziale.

W modelowaniu zjawisk akustycznych do celów prognozowania klimatu akustycznego interesują nas relacje między wielkościami charakteryzującymi pole akustyczne (występujące w rozważanym środowisku) a parametrami charakteryzującymi źródła dźwięku oraz warunki propagacji. W zagadnieniach związanych z ochroną przed nadmiernym hałasem środowiska zurbanizowanego, do podstawowych parametrów pola akustycznego należy zaliczyć poziom ciśnienia akustycznego L_p , rozkład poziomów ciśnienia w znormalizowanych pasmach częstotliwości $L_p(f_n)$ oraz wskaźniki oceny hałasu, takie jak: poziom dźwięku L_A czy ekwiwalentny poziom dźwięku L_{AeqT} .

2.2. Metody modelowania źródeł hałasu środowiskowego

Podstawową zasadą w tworzeniu modeli źródeł hałasu jest dążenie do zastąpienia rzeczywistego źródła jednym ze znanych modeli teoretycznych punktowego lub liniowego źródła dźwięku, lub też równoważnym zbiorem tych źródeł [45][46][98][106][119][142][152][161]. Ponadto należy ustalić relacje między parametrami pola akustycznego lub mocą akustyczną źródła zastępczego a charakterystycznymi parametrami obiektu będącego źródłem hałasu.

Za kryterium adekwatności modeli źródeł hałasu przyjmowana jest zgodność (w rozważanym obszarze obserwacji) charakterystyk polowych rzeczywistego źródła hałasu oraz modelu. Innymi słowy, identyfikacja źródła hałasu następuje poprzez identyfikację właściwości pola akustycznego w jego otoczeniu. Ze względu np. na przebieg czasowych zmian poziomu dźwię-

¹⁷Także: Kerber G., Makarewicz R., *An optical scale model of traffic noise propagation in an urban environment*, Appl.Acoustics, 1981, 14(5), 331-345.

¹⁸Wielka Encyklopedia Powszechna, PWN 1974.

ku $L_A(t)$ w punkcie obserwacji oraz charakter zmian tego poziomu w funkcji odległości od linii ruchu źródła, modelem hałasu pojedynczego pojazdu samochodowego w swobodnym strumieniu ruchu jest punktowe, wszechkierunkowe źródło dźwięku o stałej mocy akustycznej W , które porusza się ze stałą prędkością V wzdłuż linii prostej [45][46][66][104][137]. W modelu tym maksymalny poziom dźwięku L_{AM} maleje 6 dB przy podwojeniu odległości od linii ruchu, a kształt krzywej $L_A(t)$ jest funkcją odległości punktu obserwacji i prędkości ruchu pojazdu. Jeżeli założymy, że parametrem oceny pola akustycznego jest poziom ekwiwalentny L_{AeqT} , to równoważnym modelem teoretycznym hałasu ruchomego pojazdu może być model źródła liniowego z równomiernie rozłożoną mocą akustyczną [45][63], którego pole charakteryzuje się 3 dB spadkiem poziomu dźwięku przy podwojeniu odległości od linii ruchu. Przejazd pojazdu można także rozpatrywać jako pewne zdarzenie akustyczne scharakteryzowane przez ekspozycyjny poziom dźwięku L_{AE} [67][111].

Pominąwszy metody empiryczne, w których na podstawie wyników dużej liczby pomiarów rzeczywistych obiektów poszukuje się odpowiednich zależności ogólnych, stosowane są dwie metody teoretycznego modelowania źródeł hałasu środowiskowego: metody symulacyjne oraz analityczne.

2.2.1. Metody symulacyjne

Symulacja, wg Słownika języka polskiego jest to naśladowanie pewnych procesów za pomocą procesów przebiegających w maszynie matematycznej. Symulacja umożliwia prowadzenie badań właściwości modelowanych obiektów, zjawisk lub procesów występujących wprawdzie w naturze, lecz trudnych do obserwowania.

W przypadku modelowania źródeł hałasu środowiskowego (ZHS) istotą symulacyjnych metod jest dążenie do odtworzenia w modelu chwilowych zmian stanu źródła (patrz rozdz.3.2). Uwzględnia się to poprzez identyfikację położenia i mocy akustycznej wszystkich składowych źródeł dźwięku w wybranych momentach czasowych t_n , a następnie wyznaczenie chwilowej wartości poziomu dźwięku $L_A(t)$ z zasady superpozycji dla chwilowych poziomów dźwięku $L_{Ai}(t)$, pochodzących od poszczególnych źródeł składowych. Modele symulacyjne znajdują zastosowanie w modelowaniu ZHS z ruchomymi źródłami składowymi lub źródłami, których charakterystyki są opisane w kategoriach probabilistycznych. Zalety modeli symulacyjnych są oczywiste. Umożliwiają badanie dowolnych sytuacji (nawet tych rzadko występujących w rzeczywistości) oraz analizę wpływu poszczególnych parametrów wejściowych modelu na wynik prognozy. Pozwala to na wskazanie czynników dominujących oraz eliminację nieistotnych lub mało istotnych w praktycznej metodzie prognozowania. Odzworowanie struktury wewnętrznej

(ZHS) umożliwia także predykcję dowolnego parametru oceny klimatu akustycznego lub zbioru tych parametrów. W zastosowaniu do akustyki środowiskowej, gdzie warunki atmosferyczne oraz poziom zakłóceń ograniczają możliwy obszar badań eksperymentalnych w rzeczywistych układach (patrz rozdz.8.5), modele symulacyjne stanowią cenne narzędzie badawcze. Mogą one także stanowić podstawę weryfikacji innych modeli, np. Takagi [177] wykorzystał wyniki symulacji metodą Monte Carlo prostych sytuacji drogowych do weryfikacji analitycznego modelu hałasu ruchu drogowego. Brak empirycznych charakterystyk akustycznych składowych źródeł hałasu, przy bardziej złożonej strukturze (ZHS), ogranicza często możliwości praktycznego stosowania modeli symulacyjnych w prognozowaniu.

Dla obiektów, których charakterystyki opisane są w kategoriach probabilistycznych, znane są dwie metody modelowania symulacyjnego: modelowanie statystyczne (metoda Monte Carlo) lub modelowanie dynamiczne.

Modele oparte na metodzie Monte Carlo symulują statystyczne charakterystyki obiektów na podstawie wielokrotnie powtarzanej próby losowej. W każdej kolejnej próbie parametrom źródła są przypisywane przypadkowe wartości losowane ze znanych skądinąd rozkładów, np. ustalonych na podstawie badań empirycznych lub przyjętych założeń. Kolejne próby losowe są niezależne, tzn. symulowany stan źródła w n -tej próbie nie zależy od stanu źródła w $(n-1)$ próbie. W przypadku np. modelowania hałasu drogowego próba losowa jest jakby fotografią sytuacji drogowej, wynikającej z zadanych warunków ruchu, która została wykonana w pewnym dowolnym momencie t_n okresu obserwacji T . Wynikiem procesu symulacji metodą Monte Carlo, której błąd zależy od liczby prób, jest rozkład prawdopodobieństwa $p(L_A)$ poziomów dźwięku L_A , na podstawie którego wyznacza się parametry oceny klimatu akustycznego.

W modelach dynamicznych jest symulowana przestrzenno-czasowa struktura źródła, poprzez symulację ruchu źródeł składowych lub losowych zmian ich położenia, a także symulację zmian mocy akustycznej. Symulacja zachodzi dla kolejnych dyskretnych momentów czasowych t_i , oddalonych od siebie o Δt . W tym przypadku stan źródła w momencie t_{i+1} zależy od stanu źródła w momencie t_i , a zmiany wartości mocy akustycznej oraz położenia źródeł składowych zachodzą zgodnie ze zdefiniowanym zbiorem reguł symulacyjnych. Przykładowo, w modelu symulacyjnym hałasu ruchu drogowego położenie każdego pojazdu w kolejnych momentach t_n jest funkcją jego prędkości ruchu, a moc akustyczna zależy od prędkości i rodzaju pojazdu (patrz rozdz.4). Wynikiem procesu symulacji dynamicznej jest zbiór dyskretnych wartości $\{L_A(t_n)\}$ przebiegu czasowych zmian poziomu dźwięku w punkcie obserwacji, który można interpretować podobnie jak wynik pomiaru. Możliwe jest zatem wyznaczenie dowolnego parametru oceny klimatu akustycznego lub zbioru tych parametrów wg ogólnie znanych zależności.

2.2.2. Metody analityczne

W metodach analitycznego modelowania, korzystając ze znanych praw dotyczących emisji i propagacji dźwięku oraz aparatu matematycznego, wyznaczamy jawną postać zależności, która wiąże wielkości charakteryzujące badany obiekt z wynikowym parametrem oceny klimatu akustycznego: poziomem ekwiwalentnym L_{AeqT} czy poziomami statystycznymi L_{A50} lub L_{A10} .

Klasyczne modele analityczne, w których poszukuje się funkcji lub statystyk opisujących wypadkowy poziom dźwięku, wymagają na ogół przyjęcia wielu szczegółowych założeń upraszczających, co powoduje, że znajdują one zastosowanie do ograniczonej klasy obiektów, np. dla których można przyjąć deterministyczny model ruchu źródeł składowych lub model uwzględniający tylko jedną charakterystykę probabilistyczną. Praktyczne rozwiązania analityczne uzyskano dla hałasu drogowego [48/Ch.32] [69][119/Ch.10][102][161][152][177] oraz hałasu kolejowego [108][119] [161], dla sytuacji w której można założyć, iż składowe źródła dźwięku (pojazdy lub pociągi) o stałej mocy akustycznej poruszają się ze stałą prędkością wzdłuż linii prostej. W przypadku złożonych źródeł hałasu, próby zbliżenia modelu do rzeczywistości np. przez wprowadzenie kilku charakterystyk probabilistycznych, komplikują zależności analityczne, co w skrajnym przypadku podważa celowość ich stosowania (patrz rozdz.4.1).

Do modeli analitycznych należy także zaliczyć modele hałasu oparte na zasadzie superpozycji ekwiwalentnych poziomów dźwięku zdarzeń elementarnych, w których wykorzystuje się wynikające z definicji właściwości ekwiwalentnego poziomu L_{AeqT} (patrz rozdz. 3.6). Ustalenie w międzynarodowej normalizacji ekwiwalentnego poziomu dźwięku L_{AeqT} jako podstawowego parametru oceny klimatu akustycznego [57] przyniosło istotne uproszczenie w stosowaniu analitycznych modeli hałasu środowiskowego.

2.3. Metody modelowania pola akustycznego w układach przestrzennych

Do opisu i badania pola akustycznego w układach przestrzennych, zarówno zamkniętych, jak i otwartych, stosuje się trzy podstawowe metody teoretyczne: metodę falową, metodę geometryczną oraz metodę statystyczną, chociaż zakres zastosowania tych metod w obu przypadkach jest nieco odmienny. W zagadnieniach związanych z akustyką środowiska, metoda falowa polegająca na rozwiązaniu równania falowego dla zadanych warunków brzegowych, ze względu na trudności matematyczne, jakie napotyka się nawet podczas analizy układów zamkniętych o najprostszych kształtach, nie znalazła powszechniejszego zastosowania.

2.3.1. Metody geometryczne

Zasady akustyki geometrycznej są znane od dawna [157]. Podstawowym założeniem określającym zakres stosowania metod geometrycznego modelowania jest założenie, że wymiary geometryczne układu przestrzennego oraz obiektów ją wypełniających są duże w porównaniu z długością rozchodzącej się fali akustycznej. Istotą metody geometrycznej jest założenie, że fala akustyczna reprezentowana jest przez promienie dźwiękowe, które rozchodząc się (podobnie jak promienie świetlne) podlegają prawom odbicia (prostego lub rozproszonego) oraz ugięcia, zgodnie z zasadami optyki geometrycznej. Na zasadzie analogii metody te nazwano metodami akustyki geometrycznej. W metodzie geometrycznej wszystkie zjawiska elementarne są rozpatrywane oddzielnie, a wypadkowe pole akustyczne jest wyznaczane na zasadzie superpozycji zjawisk elementarnych. Przy stosowaniu metody geometrycznej do złożonych układów przestrzennych, przez wiele lat trudności związane z analizą tras promieni dźwiękowych, były powodem ograniczonego zakresu jej stosowania [176]. Dopiero rozwój techniki komputerowej pozwolił na praktyczne wykorzystanie metody geometrycznej w modelowaniu pola akustycznego zarówno w pomieszczeniach, jak i przestrzeni otwartej (patrz rozdz.2.4.1) [119][161].

W geometrycznym modelowaniu pola akustycznego w przestrzeni ograniczonej stosuje się dwie zasadnicze metody realizacji numerycznej modelu: metodę obrazów pozornych oraz metodę promieniową. Różnią się one sposobem poszukiwania możliwych tras promieni dźwiękowych między źródłem i punktem obserwacji [80][200]. Metoda obrazów pozornych jest metodą (quasi)deterministyczną, w której poszukiwanie możliwych tras promieni przebiega wg schematu (grafu tras) zdeterminowanego przestrzenną konfiguracją źródeł dźwięku, elementów przestrzeni i punktu obserwacji. Metoda promieniowa zawiera czynnik probabilistyczny. W sposób losowy jest ustalany początkowy kierunek promienia dźwiękowego, którego trasa jest następnie śledzona aż nie osiągnie odbiornika, przy czym zmiany kierunku promienia dźwiękowego mogą zachodzić także w sposób losowy. Z wymienionych względów metoda obrazów pozornych wydaje się dogodniejsza do analizy zjawiska dyfrakcji, natomiast metoda promieniowa do analizy zjawiska odbicia rozproszonego. Ze względu na efektywność metody obliczeniowej, wynikającej ze sposobu poszukiwania tras promieni dźwiękowych, metoda obrazów pozornych ma zdecydowaną przewagę w zastosowaniu do przestrzeni zurbanizowanej.

2.3.2. Metody statystyczne

Metody statystyczne opierają się na probabilistycznym ujęciu zagadnienia propagacji fali akustycznej w układzie ograniczonym. Podstawą me-

toż statystycznych jest założenie o jednorodność pola akustycznego występującego w rozważanym układzie przestrzennym (np. gęstość energii akustycznej jest stała w całym obszarze), co umożliwia zastąpienie ścisłych wartości charakteryzujących rozkład pola akustycznego w układzie przestrzennym pewną wartością średnią. W zastosowaniu do akustyki urbanistycznej można tu wymienić prace Kuttruffa [86], Shawa i Olsona [166] (patrz rozdz.2.4.2).

2.4. Modele pola akustycznego w przestrzeni zurbanizowanej

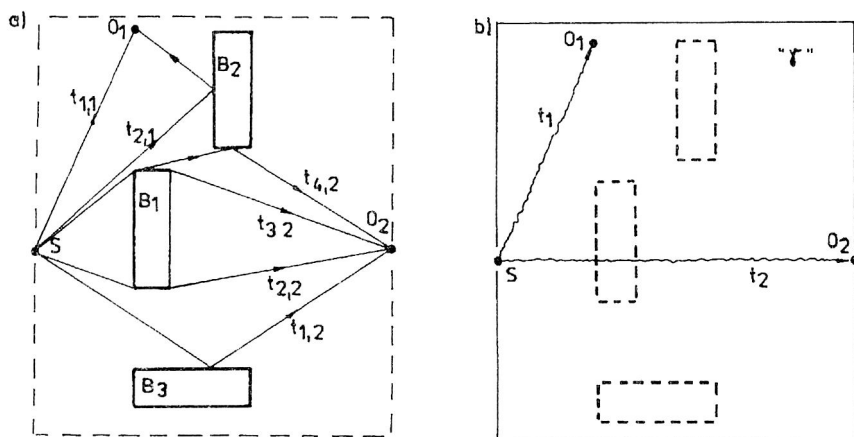
Elementarne zjawiska akustyczne, które decydują o wypadkowym klimacie akustycznym w obszarze zurbanizowanym, można podzielić na zjawiska niezależne od charakteru zabudowy (pochłanianie przez powierzchnię gruntu czy pochłanianie w powietrzu), zjawiska wynikające z wypełnienia przestrzeni otwartej obiektami budowlanymi (odbicie od fasad budynków, ekranowanie czy rozproszenie) oraz zjawiska związane ze stanem i niejednorodnością środowiska (np. refrakcja wynikająca z gradientu temperatury czy prędkości wiatru).

Zjawiska należące do dwóch pierwszych grup można zaliczyć do zjawisk o charakterze quasi-deterministycznym. Wprawdzie zależności je opisujące są ściśle deterministyczne, lecz parametry akustyczne charakteryzujące przestrzeń mają często charakter losowy. Zjawiska akustyczne związane z warunkami atmosferycznymi, ze względu na dużą ich zmienność, należy zaliczyć do zjawisk o charakterze probabilistycznym, chociaż opis tych zjawisk dla chwilowego stanu środowiska jest deterministyczny.

2.4.1. Modele geometryczne

W matematycznych modelach pola akustycznego w przestrzeni zurbanizowanej formułowanych zgodnie z regułami akustyki geometrycznej, analizowane są wszystkie trasy fali dźwiękowej między punktowym źródłem dźwięku a punktem obserwacji. Bierze się pod uwagę odbicia i ugięcia na pojedynczych obiektach przestrzeni z uwzględnieniem ich wymiarów geometrycznych i położenia (rys.2.1a). Ze względu na szczegółowość opisu przestrzeni oraz analizy zjawisk elementarnych modele te można nazwać modelami w skali *mikro*.

W dotychczasowych pracach dotyczących modelowania pola akustycznego w przestrzeni zabudowanej, które opierają się na metodzie geometrycznej, rozważano głównie wpływ wielokrotnych odbić na parametry wypadkowego pola akustycznego. Zakładano przy tym, że źródła hałasu, obiekty przestrzeni oraz punkty obserwacji znajdują się na gładkiej, twardej płasz-



Rys. 2.1. Schemat ideowy: a) modelowanie w skali mikro, b) modelowanie w skali makro

Fig. 2.1. Schematic diagram: a) microscopic type modelling, b) macroscopic type modelling

czyźnie horyzontalnej, a propagacja dźwięku zachodzi w idealnym bezstratnym ośrodku, przy czym wpływ pola fal ugiętych jest pomijalnie mały. Analizę geometryczną wpływu wielokrotnych odbić na propagację hałasu wzdłuż obustronnie zabudowanej ulicy zastosował Wiener i inni [185] już w 1965 roku, a następnie rozwinął Davies [23], uwzględniając pole dyfuzyjne. Przegląd wcześniejszych prac dotyczących zagadnień związanych z modelowaniem propagacji dźwięku w przestrzeni zurbanizowanej można znaleźć w pracach [97][161][166], a także [119].

Zagadnienie wpływu zjawiska dyfrakcji na wypadkowe pole akustyczne analizowane było przede wszystkim w kontekście oceny efektu ekranowania przez bariery umieszczone na odbijającej powierzchni gruntu [7][8][24][49][70][71]¹⁹. Clayden i inni [20] uwzględnili wprawdzie efekt ekranowania, (przyjmując do jego opisu model Maekawy), jednak w praktycznej realizacji numerycznej ograniczyli rozważania do dwuwymiarowego modelu przestrzeni, co stanowi istotne ograniczenie.

Mimo stosunkowo bogatej literatury dotyczącej fizyki zjawisk elementarnych, brak jest dotychczas geometrycznych modeli numerycznych pola

¹⁹Także:

- *Badania teoretyczne i terenowe ekranów urbanistycznych naturalnych i sztucznych do ochrony budynków przed hałasem komunikacyjnym i przemysłowym*, Praca IPPT PAN, 1979.

- *Opracowanie metod projektowania i obliczania naturalnych i sztucznych ekranów urbanistycznych*, Praca IPPT PAN, 1980.

akustycznego w przestrzeni zurbanizowanej, ujmujących w sposób kompleksowy wszystkie czynniki wpływające na wypadkowy klimat akustyczny. Jest to wynikiem tak problemów związanych z algorytmizacją modelu teoretycznego (zwłaszcza z modelowaniem zjawiska dyfrakcji na dowolnych obiektach), jak i numeryczną realizacją modelu. Leschnik zastosował metodę promieniową do analizy propagacji dźwięku w przestrzeni zurbanizowanej [91]. Jednak metoda ta znajduje zastosowanie tylko do ograniczonej klasy sytuacji, gdy zabudowa ma regularny układ geometryczny. Bardziej skomplikowane programy komputerowe, które pozwalają na obliczenie poziomu dźwięku hałasu drogowego z uwzględnieniem topografii terenu oraz zabudowy, opracowane zostały m. innymi przez Rathe'go, Favre i Thomassena [119][161]. Jednak programy te ułatwiają tylko wykonanie obliczeń²⁰. Podstawę stanowią metody obliczeniowe, w których wpływ warunków propagacji dźwięku (pochłanianie przez powierzchnię gruntu, efekt odbicia i ekranowania) uwzględnia się w formie odpowiednich poprawek.

Zasady akustyki geometrycznej znalazły także zastosowanie do formułowania modeli analitycznych hałasu komunikacyjnego dla prostych układów urbanistycznych [20][106][108][109][111][152][161][192]. Yeow i inni [192] wykorzystali je np. w analitycznej analizie wpływu budynków (usytuowanych w równych odstępach, równolegle do odcinka drogi) na poziom dźwięku L_{AeqT} hałasu generowanego przez strumień pojazdów samochodowych.

2.4.2. Modele statystyczne

W modelach statystycznych, które inaczej można nazwać modelami w skali *makro*, obszar zurbanizowany lub jego fragmenty zastępowane są mniej lub bardziej abstrakcyjnymi modelami przestrzeni, w której zakłada się występowanie pola rozproszonego [86][91][92] lub pogłosowego [23][41][166]. Modele te znajdują zastosowanie raczej do oceny średniego klimatu akustycznego występującego na dużych, jednorodnych obszarach zurbanizowanych, niż do analizy dokładnych wartości parametrów pola akustycznego. Ze względu na przyjmowane założenia wyjściowe, model przestrzeni rozpraszającej odnosi się do obszarów luźnej, niskiej zabudowy, charakterystycznej dla dzielnic mieszkaniowych. Modele pogłosowe znajdują natomiast zastosowanie w analizie statystyk hałasu komunikacyjnego występującego w obszarach zwartej, wysokiej zabudowy, gdzie ulice tworzą regularny układ *głębokich kanionów*.

²⁰W programach tych, do wyznaczenia trasy promieni dźwiękowych między wybranym punktem obserwacji i zbiorem źródeł punktowych, które reprezentują emisję dźwięku z odcinka drogi, wykorzystuje się metodę źródeł pozornych. Jednak położenie i liczba źródeł punktowych zmienia się w zależności od usytuowania punktu obserwacji [119].

Do opisu propagacji hałasu komunikacyjnego w obszarze zabudowy mieszkaniowej Kuttruff [86] wykorzystał model rozpraszania na izotropowo rozmieszczonych obiektach dla niekoherentnych korpuskuł²¹ dźwiękowych. W modelu tym właściwości rozpraszające układu przestrzennego określają: średni przekrój obiektów rozpraszających, średnia gęstość zabudowy oraz średni współczynnik pochłaniania ścian budynków. Przybliżone rozwiązanie analityczne, które opisuje gęstość energii akustycznej w funkcji odległości od źródła dźwięku, wyznaczone zostało tylko dla przestrzeni dwuwymiarowej. Przy podobnych założeniach problem propagacji dźwięku w układzie trójwymiarowym analizował Leschnik stosując symulację metodą Monte Carlo [91].

Shaw i Olson [166], Davies i Lyon [23], a następnie Froseth i Lambert [41] rozważali modele, w których obszar zurbanizowany, np. miasto lub jego fragment, zastępowany jest modelem przestrzennej sieci komórek elementarnych (ogniw), które reprezentują obszary między zabudową. Model ten nazywany jest modelem komórkowym lub modelem pogłosowym. W modelach tych, wypadkowe pole akustyczne w układzie dwuwymiarowym [166] lub trójwymiarowym [23][41] traktuje się jako sumę pola bezpośredniego oraz pola pogłosowego. Powstaje ono w wyniku wielokrotnych odbić fal dźwiękowych od powierzchni ograniczających, zdeterminowanych przez warunki brzegowe rozpatrywanej komórki elementarnej²².

2.5. Problemy empirycznej weryfikacji modeli emisji i propagacji hałasu

W odniesieniu do zjawisk fizycznych rozstrzygającym kryterium adekwatności zastosowanych teorii, praw czy modeli, jest zgodność ich ilościowej analizy z wynikami pomiarów [106]. W modelach emisji oraz propagacji hałasu wielkością wyjściową (modelowaną) jest na ogół poziom ciśnienia akustycznego L_p lub skorygowany poziom dźwięku L_A . Wyznacza się go jako funkcję zbioru parametrów wejściowych modelu, charakteryzujących źródła hałasu lub przestrzeń propagacji. Możliwe jest zatem bezpośrednie porównanie wartości zmierzonych z wartościami uzyskanymi na podstawie modelu dla takich samych warunków. Należy jednak mieć na uwadze, że wyznaczona różnica między wynikiem jednokrotnego pomiaru i obli-

²¹Korpuskuła - hipotetyczny, punktowy obiekt, obdarzony energią akustyczną, poruszający się z prędkością dźwięku i spełniający prawa akustyki geometrycznej [98].

²²Czynnikiem określającym pole fal odbitych jest stosunek powierzchni odbijających i powierzchni idealnie pochłaniających, symulujących otwarte ściany komórki.

czeń nie może być utożsamiana z błędem modelu, dotyczy to zwłaszcza eksperymentów prowadzonych w warunkach przestrzeni otwartej, gdzie wyniki pomiaru są obciążone dużym błędem przypadkowym (patrz rozdz.4.5 i 7.5).

Można wyróżnić trzy podstawowe składniki wpływające na wartość różnicy, $\delta L_{\text{def}} = (\bar{L}_{\text{def}} - \tilde{L}_{\text{def}})$, między wartościami zmierzonymi, $\bar{L}_{\text{def}}$, i obliczonymi, $\tilde{L}_{\text{def}}$, wybranego wskaźnika oceny hałasu L_{def} (patrz 3.2):

- błąd oszacowania parametru $\tilde{L}_{\text{def}}$ wynikający z przyjętej metody pomiaru (błąd pomiaru); np. błąd próbkowania podczas pomiarów hałasu drogowego,

- błąd oszacowania parametru $\tilde{L}_{\text{def}}$ wynikający z przyjętej metody numerycznej (błąd metody obliczeniowej); np. w przypadku modelu symulacyjnego hałasu strumienia pojazdów jest to błąd dyskretyzacji czasowej modelu (patrz rozdz.4.5), natomiast w przypadku modelu geometrycznego błąd wynikający z ograniczonego rzędu N obrazu pozornego (patrz rozdz. 7.5 i 9.2.1);

- błąd modelu wynikający z niedokładności odwzorowania struktury wewnętrznej źródła lub układu przestrzennego oraz poprawności przyjętych parametrów wejściowych (błąd modelu).

Udział składowych błędów w wypadkowej różnicy δL_{def} zależy w istotny sposób od charakteru modelowanego obiektu oraz warunków przeprowadzania eksperymentów empirycznych. Błąd pomiaru odgrywa istotną rolę w przypadku eksperymentów prowadzonych w przestrzeni otwartej z wykorzystaniem rzeczywistych źródeł hałasu środowiskowego, gdzie na błąd metody pomiarowej nakłada się przypadkowy błąd wynikający ze zmiennych warunków meteorologicznych oraz występowania przypadkowych źródeł zakłócających. Kontrola tych czynników w trakcie eksperymentu nie jest na ogół możliwa. W eksperymentach wykonywanych w pomieszczeniach wykorzystuje się na ogół wzorcowe lub laboratoryjne źródła dźwięku o znanych charakterystykach mocowych, a właściwości ośrodka można uznać za stałe. Stąd błąd pomiaru odgrywa w tym przypadku znacznie mniejszą rolę.

W większości przypadków obliczenia modelowe wykonywane są w warunkach niepełnej wiedzy co do dokładnych wartości parametrów akustycznych, takich jak współczynniki odbicia od powierzchni ograniczających, oporności przepływu powierzchni gruntu itp. Należy zdać sobie sprawę, że wartości parametrów akustycznych charakteryzujących przestrzeń zurbanizowaną zależą od tak wielu czynników (np. pory roku, pory dnia, warunków atmosferycznych), iż praktycznie można je uważać za losowe, tzn. należące do pewnego przedziału wartości prawdopodobnych.

Przy losowym charakterze opisywanych zjawisk oraz charakterystyk akustycznych, porównanie wyników procesu modelowania i pomiaru można

przeprowadzać tylko w sensie statystycznym, porównując parametry rozkładów estymatorów odpowiednich wielkości uzyskanych w procesie wielokrotnej symulacji i pomiaru dla tych samych sytuacji. W praktyce, ze względu na czasochłonność eksperymentów oraz zmienność warunków, postępowanie takie nie zawsze jest możliwe. Dlatego w badaniach weryfikacyjnych modeli emisji oraz propagacji dźwięku w przestrzeni zurbanizowanej oraz interpretacji wyników prognozowania, zagadnieniem o podstawowym znaczeniu jest analiza błędu metody oraz wpływu wartości parametrów wejściowych modelu na wynik prognozy.

3. MODELOWANIE ŹRÓDEŁ HAŁASU ŚRODOWISKOWEGO

3.1. Wprowadzenie. Określenia

Do głównych źródeł hałasu środowiskowego (ZHS) w aglomeracjach miejskich należą elementy układu komunikacyjnego (arterie komunikacyjne, skrzyżowania, wielopoziomowe węzły drogowe), szlaki kolejowe, obiekty zaplecza komunikacyjnego, takie jak bazy transportowe, parkingi, zajezdnie, stacje rozrządowe, a także zakłady przemysłowe [161]. Przyczyną występowania hałasu w otoczeniu tych obiektów są na ogół rzeczywiste źródła dźwięku znajdujące się w obrębie wymienionych obiektów, które będziemy nazywać źródłami składowymi. W przypadku np. arterii komunikacyjnej czy zajezdni autobusowej składowymi źródłami hałasu są pojedyncze pojazdy samochodowe. Wymienione źródła hałasu środowiskowego cechuje wprawdzie duże zróżnicowanie pod względem typu składowych źródeł hałasu i ich konfiguracji w obrębie obiektu, wymiarów geometrycznych i kształtu obszaru, jednak ze względu na sposób emisji hałasu do otoczenia można je zakwalifikować do wspólnej klasy powierzchniowych źródeł hałasu środowiskowego²³ [161].

Do celów niniejszej pracy przyjmuje się następującą definicję powierzchniowego²⁴ źródła hałasu środowiskowego:

def.3.1. Źródło powierzchniowe hałasu środowiskowego (ZHS) jest obszarem terenu o wymiarach dużych w porównaniu z odległościami punktów obserwacji od źródła, na którym znajduje się wiele źródeł składowych;

gdzie:

def.3.2. Składowe źródło hałasu jest źródłem rzeczywistym, dla którego możliwa jest identyfikacja jego położenia na obszarze ZHS oraz określenie jego mocy akustycznej równoważnej emisji dźwięku do otoczenia²⁵ [56][125].

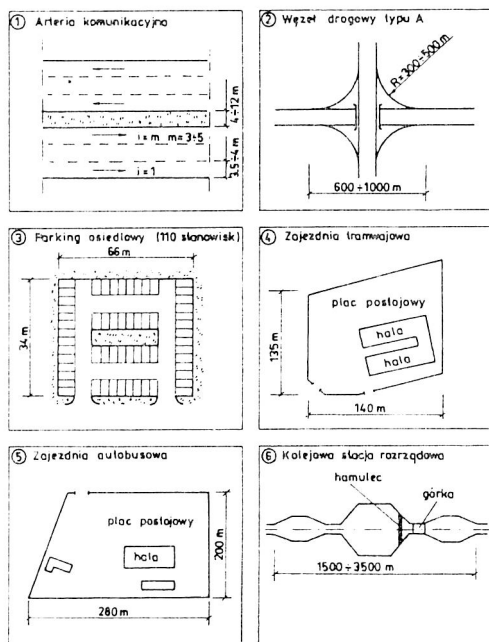
Składowe źródła dźwięku można zaliczyć do jednej z następujących klas.

1. Stacjonarne, tj. takie którego położenie na obszarze ZHS jest stałe w rozpatrywanym odcinku czasu T:

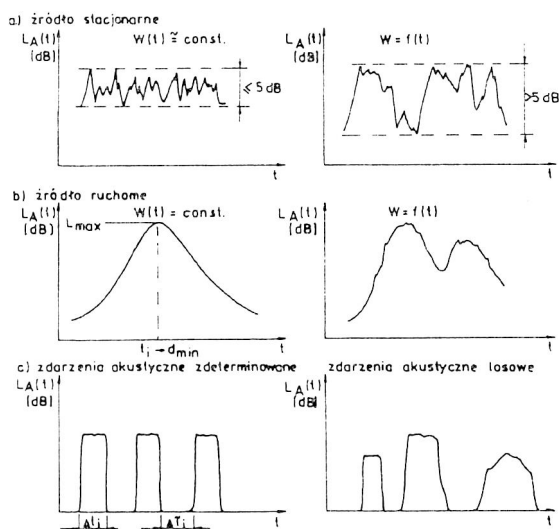
²³ Liniowe źródło dźwięku rozpatruje się jako szczególny przypadek źródła powierzchniowego.

²⁴ Definicję podano w celu odróżnienia omawianej klasy źródeł od fizycznie rozumianego źródła powierzchniowego, jako drgającej współfazowo powierzchni o równomiernie rozłożonej mocy akustycznej [110].

²⁵ W dalszej części pracy przez pojęcie moc akustyczna źródła dźwięku środowiskowego rozumiana będzie moc akustyczna równoważna emisji do otoczenia w sensie definicji podanej w pracy [56].



Rys. 3.1. Przykładowe schematy geometryczne obiektów komunikacyjnych, będących powierzchniowymi źródłami hałasu środowiskowego (ZHS)
 Fig. 3.1. Exemplary geometric diagrams of traffic objects, being plane sources of environmental noise (ENS)



Rys. 3.2. Zmiany poziomu dźwięku $L_A(t)$ w funkcji czasu dla wyróżnionych rodzajów źródeł składowych
 Fig. 3.2. A-weighted sound pressure level $L_A(t)$ as a function of time for particular kinds of component sources

- o stałej w czasie mocy akustycznej,
- o zmiennej w czasie mocy akustycznej.

2. Ruchome zorganizowane, tj. takie którego położenie na obszarze ZHŚ zmienia się w sposób ciągły w okresie T:

- o stałej w czasie mocy akustycznej,
- o zmiennej w czasie mocy akustycznej.

3. Ruchome niezorganizowane, których położenie i czas działania zmieniają się w sposób skokowy, a hałas emitowany do otoczenia jest ciągiem zdarzeń akustycznych:

- zdeterminowane, gdy moment występowania zdarzenia, t_i , czas trwania, Δt_i , i moc akustyczna, W_i , zdarzenia są jednoznacznie określone,
- losowe, gdy miejsce i czas wystąpienia zdarzenia na obszarze ZHŚ lub parametry zdarzenia, Δt_i i W_i , mają charakter losowy.

Przykładem składowych źródeł hałasu należących do grupy (3) są zdarzenia wagonów kolejowych w obszarze stacji rozrządowych [142].

W dalszej części pracy dla uproszczenia zapisu, określenie (ZHŚ) odnosić się będzie do źródeł hałasu w sensie def.3.1. Przykładowe schematy geometryczne ZHŚ pokazano na rys 3.1.

3.2. Model źródła hałasu środowiskowego

Istotą procesu formułowania modelu emisji dźwięku z obszaru źródła hałasu środowiskowego jest poszukiwanie określonych związków między wielkościami charakteryzującymi obiekt (źródło hałasu) a parametrami pola akustycznego w jego otoczeniu, które pozwalają na ocenę uciążliwości jego oddziaływania.

Uwzględniając def.3.1 oraz 3.2 do celów niniejszej pracy wprowadza się następujące definicje modelu ZHŚ:

def.3.3. Modelem (M) powierzchniowego źródła hałasu środowiskowego jest zbiór zależności (reguł), przyporządkowujących zbiorowi parametrów stanu źródła zbiór wartości wskaźników L_{def} oceny klimatu akustycznego występującego w otoczeniu (ZHŚ) przy założeniu warunków przestrzeni swobodnej w otoczeniu:

$$M: \{\text{stan źródła}\} \Rightarrow L_{def} \in \{L_{def}\}, \quad (3.1)$$

gdzie:

Stan źródła - **def.3.4.** Zbiór parametrów wystarczających do określenia emisji dźwięku z obszaru ZHŚ, które można klasyfikować jako:

- parametry akustyczne $\{A(U)\}$ charakteryzujące źródła składowe;

- parametry geometryczne $\{P(U)\}$ opisujące przestrzenną strukturę ZHŚ;
 - parametry funkcjonalne obiektu $\{U\}$ związane z emisją hałasu, np. takie jak: natężenie ruchu na arterii komunikacyjnej, pojemność zajezdni, itp.,
- $\{L_{def}\}$ - zbiór wskaźników oceny klimatu akustycznego obejmujący [157]:
- poziom ekwiwalentny L_{AeqT} , dB;
 - poziomy statystyczne L_{Ax} , gdzie $x \in \{99, 90, 50, 10, 01\}$.

W dalszej części pracy parametrami modelu (M) nazywać będziemy stałe współczynniki występujące w regułach modelu (stałe empiryczne wyznaczone dla danego typu obiektu); parametrami wejściowymi modelu wielkości wprowadzane do modelu jako dane charakteryzujące obiekt a parametrami wyjściowymi wskaźniki oceny klimatu akustycznego generowane przez model.

Sformułowanie modelu ZHŚ polega na nadaniu ogólnej zależności (3.1) postaci sformalizowanego zapisu matematycznego, który daje (dla określonych warunków) statystycznie wiarygodne oszacowanie wskaźnika oceny klimatu akustycznego L_{def} . Spełnione przy tym powinno być kryterium (3.2):

$$\langle \tilde{L}_{def} \rangle - \langle \tilde{L}_{def} \rangle < \varepsilon, \quad (3.2)$$

w którym; ε jest założonym błędem prognozy, symbol $(-)$ odnosi się do wyniku pomiaru, $(\sim)$ do wyniku prognozy, a $\langle \rangle$ oznacza wartość średnią.

Sformułowanie opisu analitycznego ZHŚ możliwe jest jedynie przy przyjęciu szeregu założeń upraszczających lub ograniczających. Wynika to ze złożoności oraz różnorodności rzeczywistych obiektów, rozważanych jako ZHŚ, zarówno pod względem struktury geometrycznej, jak i liczby oraz typów źródeł składowych, a także konieczności uwzględnienia wielu czynników o charakterze deterministycznym i losowym. Przyjęcie prostych modeli (wiele szczegółowych założeń upraszczających) ułatwia wprawdzie sformułowanie opisu matematycznego, prowadzi jednak często do istotnych rozbieżności między wynikiem predykcji a rzeczywistością. Przykładem może tu być przyjmowany w początkowym okresie badań deterministyczny model hałasu ruchu drogowego, w którym pojazdy o takiej samej mocy akustycznej poruszają się ze stałą, jednakową prędkością, w równych odstępach (patrz rozdz.4.1). Z drugiej strony, w wielu przypadkach sformułowanie dokładnego opisu struktury źródła jest wręcz niemożliwe, a próby opisu złożonej rzeczywistości w ścisłych kategoriach matematycznych prowadzą do skomplikowanych wieloparametrowych modeli. Problem taki np. pojawia się podczas próby analitycznego opisu geometrii wielopoziomowego

węzła drogowego oraz symulacji ruchu pojazdów w obszarze węzła (patrz rozdz.8).

Podane uwagi oraz doświadczenia zdobyte w trakcie badań nad modelowaniem źródeł hałasu środowiskowego²⁶ upoważniają do stwierdzenia, że etap definiowania założeń wyjściowych do modelu ma fundamentalne znaczenie w procesie modelowania emisji rzeczywistych źródeł hałasu środowiskowego. Dlatego w dalszych rozdziałach pracy wiele uwagi poświęcono omówieniu założeń wyjściowych, przyjmowanych zarówno na etapie formułowania uogólnionych modeli, jak i konstruowania modeli szczegółowych.

3.3. Analityczne sformułowanie modelu

Rozwinięta w niniejszej pracy koncepcja modelowania źródeł hałasu środowiskowego polega na rozkładzie ZHS na źródła elementarne, które można zastąpić jednym ze znanych teoretycznych modeli źródeł dźwięku, a następnie syntezie prowadzącej do wyznaczenia pola akustycznego w otoczeniu ZHS jako superpozycji oddziaływania wszystkich źródeł elementarnych. W takim ujęciu problem poszukiwania zależności funkcyjnej, lub zbioru tych zależności, zapisanych ogólnym wyrażeniem (3.1), sprowadza się do poszukiwania charakterystyk elementarnych źródeł punktowych dla ustalonych wcześniej kryteriów ich identyfikacji²⁷. Na rysunku 3.3 zilustrowano ideę przyjętej koncepcji.

3.3.1. Założenia generalne

Na podstawie definicji def.3.1, 3.2 i 3.3, ogólnej zależności (3.1) oraz uwzględniając, że znane analityczne opisy elementarnych zjawisk fizycznych związanych z propagacją fali akustycznej dotyczą fali emitowanej przez punktowe źródło dźwięku (patrz rozdz.6), w modelowaniu źródeł hałasu środowiskowego przyjęto następujące założenia generalne:

ZG1. Do celów modelowania emisji dźwięku każde rzeczywiste źródło hałasu środowiskowego (ZHS) zastępuje się źródłem punktowym lub zbiorem zastępczych źródeł punktowych, zwanych dalej źródłami elementarnymi.

²⁶ Badania prowadzono w ramach CPBR 11.4, cel 260 pt. *Opracowanie metody prognozowania hałasu emitowanego z obszarów dużych źródeł powierzchniowych pod kierunkiem autorki.*

²⁷ Ze względu na ograniczoną objętość pracy w rozważaniach ogólnych pominięto zagadnienia związane z empiryczną estymacją parametrów akustycznych składowych źródeł hałasu. Ustalenie średnich (typowych) charakterystyk akustycznych, jak widać na przykładzie estymacji mocy akustycznej pojazdów poruszających się w swobodnym strumieniu ruchu (rozdz.4.4), stanowi oddzielny problem badawczy.

- ZG2. Źródło elementarne reprezentuje w modelu rzeczywiste składowe źródło dźwięku (rozdz.3.1) lub wydzielony podobszar ZHS, na którym występują stacjonarne i/lub ruchome (zorganizowane i niezorganizowane) źródła składowe.
- ZG3. Parametrami charakteryzującymi źródła elementarne są:
- moc akustyczna W lub skorygowana moc akustyczna W_A ,
 - charakterystyka widmowa mocy akustycznej $w(f)$,
 - wskaźnik kierunkowości $Q(f)$.
- ZG4. Wydzielone podobszary ZHS charakteryzują się stałymi warunkami emisji do otoczenia.
- ZG5. Do wyznaczania wypadkowego poziomu ciśnienia akustycznego/dźwięku stosuje się zasadę superpozycji kwadratów ciśnień/skorygowanych ciśnień, przy czym wielkości te dla poszczególnych źródeł składowych wyznacza się z uwzględnieniem warunków propagacji na obszarze ZHS.
- ZG6. ZHS znajduje się w półprzestrzeni swobodnej ograniczonej powierzchnią gruntu.
- ZG7. Za kryterium weryfikacji modelu emisji dźwięku przyjmuje się zgodność wskaźników oceny hałasu generowanych przez model z wartościami uzyskanymi eksperymentalnie.

3.3.2. Reguła generalna modelu ZHS

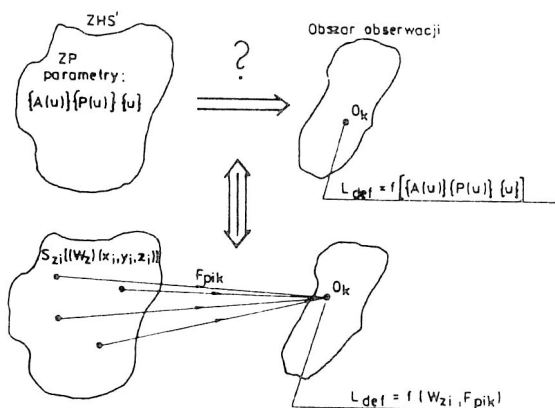
Na podstawie ZG1 i ZG2, modelem teoretycznym ZHS jest N_e elementowy zbiór niekoherentnych źródeł punktowych $\{S_i\}$, znajdujących się na obszarze ZHS (rys.3.3). Na podstawie def.3.2, dla każdego momentu t , każdemu $S_i \in \{S_i\}$ można przyporządkować moc akustyczną $W_i(\{U\})$ oraz położenie $O_{Si}(\{U\})$ w obszarze ZHS.

Reguły identyfikacji mocy akustycznej W_i oraz położenia O_{Si} źródeł elementarnych S nazwano odpowiednio modelem hałasu źródła elementarnego oraz modelem struktury ZHS:

def.3.5. Zbiór zależności definiujących moc akustyczną źródła elementarnego jest modelem hałasu źródła elementarnego (MS_e).

def.3.6. Zbiór reguł identyfikujących położenie źródeł elementarnych na obszarze jest modelem struktury ZHS (MO_S).

W modelowaniu emisji dźwięku z obszaru ZHS oraz propagacji dźwięku w środowisku zewnętrznym wystarczy rozważać zależności energetyczne (patrz rozdz.7.2.4). W niniejszej pracy, przyjmuje się, że straty energii akustycznej na drodze od elementarnego źródła dźwięku S_i do punktu obserwacji O_k (założenie ZG5) opisuje funkcja propagacji F_p , która jest zdefiniowana następująco:



Rys. 3.3. Ilustracja zastosowania metody analizy i syntezy w modelowaniu źródeł hałasu środowiskowego (ZHS)

Fig. 3.3. Illustration of the application of analysis and synthesis methods in modelling of environmental noise sources (ENS)

def.3.7. Funkcja propagacji F_p określona jest przez stosunek średniego kwadratu ciśnienia akustycznego $\bar{p}_k^2$ w punkcie obserwacji O_k do średniego kwadratu ciśnienia $\bar{p}_{r_0}^2$ występującego w punkcie odniesienia w odległości $r_0 = 1$ m od źródła punkowego w warunkach przestrzeni swobodnej:

$$F_p(S_i, O_k) = \frac{\bar{p}_k^2}{\bar{p}_{r_0}^2}.$$

Średni kwadrat ciśnienia akustycznego $\bar{p}^2$ dla punkowego źródła dźwięku, w przestrzeni otwartej wynosi:

$$\bar{p}^2(t) = \frac{W(t) Q \rho_0 c}{K \cdot \pi r(t)^2}, \quad (3.3)$$

gdzie:

$W(t)$ - chwilowa wartość mocy akustycznej źródła, W/m^2 ,

Q - współczynnik kierunkowości,

$\rho_0 c$ - impedancja charakterystyczna powietrza, $\rho_0 c = 413$ [$Pa \cdot m^{-1} \cdot s$],

r - odległość: źródło dźwięku - punkt obserwacji, m,

$K = 4$ dla przestrzeni swobodnej,

$K = 2$, gdy źródło znajduje się na powierzchni idealnie odbijającej.

Na podstawie def.(3.7) i (3.3) funkcja propagacji F_p wynosi:

$$F_p = (r_0/r(t))^2,$$

jeżeli źródło punktowe promieniuje energię w przestrzeni swobodnej oraz:

$$F_p = 2 (r_o/r(t))^2 ,$$

dla źródła punkowego umieszczonego na idealnie odbijającej powierzchni, przy czym r_o jest odległością odniesienia ($r_o = 1$ m).

Założmy, że na obszarze ZHŚ występuje N różnego typu źródeł składowych (def.3.2). Założmy dalej, że znane są reguły przyporządkowujące zbiorowi źródeł składowych $\{S_i\}$ równoważny zbiór źródeł elementarnych $\{S_{ei}\}$ oraz znane są modele MS_{ei} (def.3.5) oraz MO_{si} (def.3.6), takie że:

$$\bigwedge_{t_n \in T} \bigwedge_{S_i \in \{S_i\}} MS_{ei} : \{U\} \Rightarrow W_i , \quad (3.4)$$

przy czym: W_i może być wartością stałą, zmienną ciągle w czasie lub zmienną losową;

oraz

$$\bigwedge_{t_n \in T} \bigwedge_{S_i \in \{S_i\}} MO_{si} : \{\{U\}, \{P\}\} \Rightarrow O_{si} , \quad (3.5)$$

przy czym: położenie O_{si} może być wartością stałą, zmienną w sposób ciągły lub zmienną losową.

Po uwzględnieniu założeń ZG1-ZG5 oraz def.(3.5-3.7) i na podstawie wzoru (3.3) otrzymujemy następującą zależność opisującą chwilowy poziom ciśnienia akustycznego $L_{pk}(t)$ w punkcie obserwacji O_k w otoczeniu ZHŚ:

$$L_{pk}(t) = 10 \lg \left\{ \sum_{i=1}^{N_e} \frac{[W_i(t) \Leftarrow MS_{ei}]}{W_o} \frac{1}{4\pi r_o^2} F_{pik}([O_{si}(t) \Leftarrow MO_{si}], O_k) \right\}, \quad (3.6)$$

gdzie:

W_i - moc akustyczna i -tego elementarnego źródła wg (3.4),

F_p - funkcja propagacji między i -tym elementarnym źródłem a k -tym punktem obserwacji, wg def.3.7 z uwzględnieniem (3.5),

N_e - liczba elementarnych źródeł na obszarze ZHŚ w momencie t ,

W_o - moc odniesienia, $W_o = 10^{-12}$ W,

r_o - odległość punktu odniesienia, $r_o = 1$ m.

Jeżeli moc akustyczna W_i oraz położenie O_{si} wszystkich źródeł elementarnych są stałe w czasie, to zachodzi:

$$L_{pk}(t) = \text{const} = L_{\text{def}} \in \{L_{\text{eqT}}, L_{50}, L_{10}\}.$$

Jeżeli W_i oraz O_{si} są wielkościami zmiennymi w czasie lub losowymi, to wtedy zachodzi konieczność ustalenia reguł oraz parametrów modeli MO_{si} i MS_{ei} , które wynikają z charakterystyki funkcjonalnej danego obiektu oraz typu źródeł składowych. Metody modelowania oraz wynikające stąd zasady formułowania modeli MO_{si} i MS_{ei} dla różnych typów źródeł składowych przedstawiono w rozdz.3.4 i 3.5.

Zależność (3.6) nazwano regułą generalną modelu ZHŚ, gdyż jest podstawą do formułowania szczegółowych modeli rzeczywistych obiektów będących ZHŚ [63][64][135][137][142][143][147][148].

3.4. Modele symulacyjne

W modelach symulacyjnych elementarne źródła dźwięku reprezentują rzeczywiste źródła składowe. Reguły modeli hałasu źródeł elementarnych identyfikują ich moc akustyczną W_i poprzez symulację zmian charakterystyk mocowych rzeczywistych źródeł składowych. Reguły modelu struktury ZHŚ identyfikują położenia źródeł elementarnych symulując dynamiczne zmiany położenia rzeczywistych źródeł składowych na obszarze ZHŚ.

3.4.1. Reguła generalna modelu ZHŚ

W modelu symulacyjnym dla każdego momentu czasowego t_n zachodzi identyfikacja położenia wszystkich źródeł elementarnych występujących na obszarze ZHŚ oraz identyfikacja ich mocy akustycznej. W tym przypadku reguła generalna opisana wyrażeniem (3.6) odnosi się do wartości chwilowych wszystkich zmiennych w niej występujących.

Stąd:

$$L_{pk}(t_n) = 10 \lg \left\{ \sum_{i=1}^{N(t_n)} \frac{W_i(t_n)}{W_o} \frac{1}{4\pi r_o^2} F_{pik}(O_{si}(t_n), O_k) \right\}, \quad (3.7)$$

gdzie:

- $W_i(t_n)$ - moc akustyczna i-tego źródła elementarnego w momencie t_n , wyznaczona wg MS_e (patrz def.3.5) i rozdz.3.5.2),
- $N(t_n)$ - liczba źródeł elementarnych występujących (lub działających) w momencie t_n na obszarze ZHŚ,
- F_p - funkcja propagacji między i-tym źródłem elementarnym a k-tym punktem obserwacji, zależna od położenia O_{si} i-tego źródła w momencie t_n wyznaczanego wg modelu struktury MO_s (patrz def.3.6 oraz rozdz.3.5.3).

W zależności od typu obiektu oraz rodzaju źródeł składowych wielkości $W_i(t_n)$, $O_{si}(t_n)$ oraz $N(t_n)$ mogą być funkcjami lub zmiennymi losowymi.

3.4.2. Model hałasu źródła elementarnego

Założmy, że na obszarze ZHS występuje N różnych źródeł składowych. Jeżeli składowe źródła należą do klasy źródeł stacjonarnych lub ruchomych (def. 3.2), to reguły modelu hałasu MS_e (3.4) są zależnościami funkcyjnymi. Deterministyczną regułę modelu MS_e sformułowano następująco:

$$MS_e: \bigvee_{F_{Wk}} \bigwedge_{S_i \in \{S_N\}} \bigwedge_{k \in K} \bigvee_{f: S \rightarrow K} \{W_{ki}(t_n) = F_{Wk}(\{ \circ \}, t_n)\}, \quad (3.8a)$$

gdzie:

F_{Wk} - funkcja opisująca zmiany mocy akustycznej źródła elementarnego k -tego typu,

$\{S_N\}$ - N elementowy zbiór źródeł składowych,

K - zbiór typów źródeł składowych,

W_{ki} - moc akustyczna i -tego źródła elementarnego k -tego typu,

$\{ \circ \}$ - wyróżniony podzbiór parametrów stanu źródła (patrz def.3.4),

t_n - moment czasu.

Przykładowo, pojazdy samochodowe poruszające się w swobodnym strumieniu ruchu kwalifikuje się jako ruchome źródła składowe, przy czym mogą one należeć do pojazdów klasy lekkiej, średniej lub ciężkiej (typ źródła składowego).

Jeżeli składowe źródła należą do klasy źródeł ruchomych niezorganizowanych (def.3.2), to reguły modelu MS_e (3.4) są związkami probabilistycznymi. Probabilistyczny wariant reguł modelu MS_e sformułowano następująco:

$$MS_e: \bigvee_{P_{Wk}(\{ \circ \})} \bigwedge_{S_i \in \{S_N\}} \bigwedge_{k \in K} \bigvee_{f: S \rightarrow K} \{W_{ki}(t_n) : p_{Wk}(\{ \circ \})\}, \quad (3.8b)$$

gdzie:

$p_{Wk}(\{ \circ \})$ - rozkład mocy akustycznej źródeł elementarnych k -tego typu,

- pozostałe oznaczenia jak w zal.3.8a.

W pierwszym przypadku (zal.3.8a) nadanie mocy predykcyjnej modelowi wymaga zdefiniowania funkcji F_{Wk} oraz jej parametrów, w przypadku drugim (zal.3.8b) ustalenia typu oraz parametrów rozkładu p_{Wk} . Funkcje F_{Wk} , rozkłady p_{Wk} oraz ich parametry, zależne od rodzaju ZHS, ustala się dla każdego obiektu indywidualnie na podstawie analizy funkcjonowania tego obiektu oraz badań empirycznych. W rozdz.4 omówiono metodykę badań przyjętą podczas wyznaczania modelu hałasu pojazdów samochodowych poruszających się w swobodnym strumieniu ruchu.

3.4.3. Model struktury ZHŚ

W zależności od typu źródła składowego, podobnie jak dla modelu hałasu źródła elementarnego, sformułowano deterministyczny oraz probabilistyczny wariant reguły modelu struktury ZHŚ.

Reguła deterministyczna modelu MO_S :

$$MO_S: \bigvee_{G_k} \bigwedge_{S_i \in \{S_N\}} \bigwedge_{k \in K} \bigvee_{f: S \Rightarrow K} \{O_{ski}(t_n) = G_k(\{ \cdot \}, t_n)\}, \quad (3.9a)$$

gdzie:

- G_k - funkcja opisująca zmiany położenia i-tego źródła składowego k-tego typu,
- pozostałe oznaczenia jak w zależności (3.8a).

Probabilistyczny wariant reguły modelu MO_S :

$$MO_S: \bigvee_{p_k(O_S)} \bigwedge_{S_i \in \{S_N\}} \bigwedge_{k \in K} \bigvee_{f: S \Rightarrow K} \{O_{ski}(t_n): p_k(O_S)\}, \quad (3.9b)$$

gdzie:

$p_k(O_S)$ - rozkład położzeń składowych źródeł k-tego typu na obszarze ZHŚ.

Postać funkcji G_k oraz typ i parametry rozkładu $p_k(O_S)$ ustala się na podstawie analizy funkcjonowania obiektu będącego ZHŚ lub/oraz na podstawie badań empirycznych.

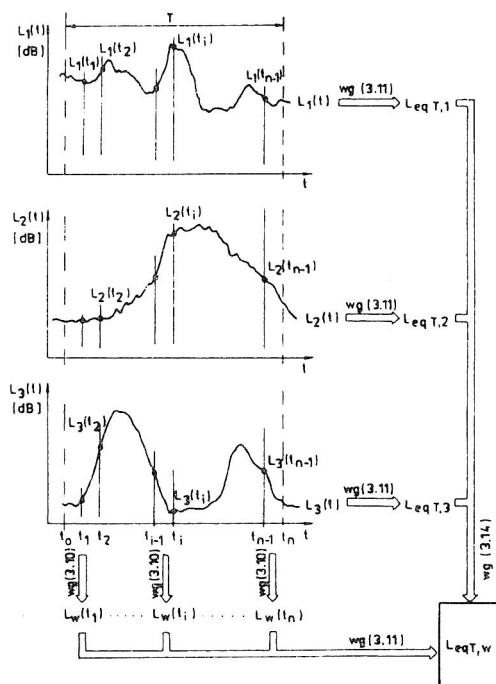
3.5. Modele zastępcze

Podstawą formułowania modeli zastępczych ZHŚ jest przyjęcie założenia, iż do celów prognozowania klimatu akustycznego każde rzeczywiste źródło hałasu środowiskowego można zastąpić równoważnym zbiorem stacjonarnych (stałych) źródeł punktowych. Istotą formułowania modeli zastępczych jest poszukiwanie zależności między mocą akustyczną źródeł elementarnych a rzeczywistymi, mierzalnymi wielkościami akustycznymi oraz parametrami funkcjonalnymi obiektu.

W pracy wprowadza się następujące definicje, określające jednocześnie znaczenie terminu *równoważny* w odniesieniu do modelu ZHŚ:

def.3.8. Źródło zastępcze - zbiór elementarnych źródeł punktowych, generujący, w zadanym obszarze obserwacji, wartości wybranego wskaźnika oceny klimatu akustycznego $\tilde{L}_{def}$, które spełniają kryterium weryfikacyjne (3.2).

def.3.9. Elementarne źródło dźwięku - punktowe, nieruchome źródło dźwięku, o równoważnej (w sensie kryterium (3.2)) mocy akustycznej W_z i wskaźniku kierunkowości Q , które reprezentuje emisję dźwięku przez stacjonarne źródło składowe lub emisję dźwięku z wyróżnionego podobszaru ZHS, na którym występują ruchome źródła składowe lub/(oraz) zdarzenia akustyczne. Elementarne źródło dźwięku umieszczone jest w miejscu stacjonarnego źródła składowego lub w środku geometrycznym podobszaru.



Rys. 3.4. Ilustracja zasady przemienności uśredniania w dziedzinie czasu i sumowania udziału źródeł składowych przy wyznaczaniu ekwiwalentnego poziomu $L_{eqT,w}$: $L_i(t)$ - poziom ciśnienia od i-tego źródła składowego, $L_{eqT,i}$ - ekwiwalentny poziom od i-tego źródła, $L_w(t_n)$ - wypadkowy poziom w momencie t_n , $L_{eqT,w}$ - wypadkowy ekwiwalentny poziom

Fig. 3.4. The principle of commutativity of averaging in the time domain and summing the contributions of all component sources when determining the equivalent continuous sound pressure level $L_{eqT,w}$; $L_i(t)$ - sound pressure level for i-th source, $L_w(t)$ - total level at moment t_n , $L_{eqT,i}$ - equivalent level for i-th source, $L_{eqT,w}$ - total equivalent level

Na mocy definicji (3.9) moc akustyczna elementarnego źródła, reprezentującego emisję dźwięku z wyróżnionego podobszaru ZHŚ, zależy od typu oraz liczby źródeł składowych na nim występujących, a także od prognozowanego wskaźnika oceny hałasu L_{def} . W niniejszej pracy rozważać będziemy modele zastępcze ZHŚ, przyjmując ekwiwalentny poziom dźwięku L_{AeqT} za wskaźnik oceny hałasu. W tym przypadku, w formułowaniu modeli zastępczych, stosuje się zasadę przemienności uśredniania w dziedzinie czasu oraz sumowania po elementach zbioru źródeł składowych, przedstawioną poniżej (rys.3.4). Zasada ta obowiązuje w odniesieniu do ekwiwalentnego poziomu ciśnienia akustycznego, L_{eqT} , (np. w paśmie oktawowym) lub ekwiwalentnego poziomu dźwięku, L_{AeqT} . Sposób obliczeń²⁸ wskaźnika L_{AeqT} zależy od stopnia uproszczenia modelu, zwłaszcza modelu propagacji dźwięku. Dlatego wyprowadzone zależności (wzory (3.10-3.13), (3.15-3.24) i (3.26-3.31)) podano dla ogólnego przypadku²⁹.

Rozważmy ogólnie sytuację, gdy w otoczeniu punktu obserwacji O_k występuje N niezależnych źródeł dźwięku, o zmiennej w czasie mocy akustycznej. Niech $\bar{p}_{ik}^2(t)$ oznacza średni kwadrat ciśnienia akustycznego od i -tego źródła w punkcie O_k . Średni kwadrat ciśnienia wypadkowego $\bar{p}_{wk}^2(t_n)$ w momencie t_n jest superpozycją kwadratów ciśnień składowych, co można zapisać:

$$\bar{p}_{wk}^2(t_n) = \sum_i^N \bar{p}_{ik}^2(t_n) , \quad (3.10)$$

Ekwiwalentny poziom L_{eqT} dla zmiennego w czasie ciśnienia akustycznego $p(t)$ zdefiniowany jest następująco [57]:

$$L_{eqT} = 10 \lg \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \bar{p}^2(t) / p_0^2 dt \right\} , \quad (3.11)$$

gdzie:

T - okres obserwacji; $T = t_2 - t_1$,
 p_0 - ciśnienie odniesienia, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

²⁸ Pośredni, w którym L_{AeqT} oblicza się na podstawie rozkładu poziomu L_{eqT} w znormalizowanych pasmach częstotliwości lub bezpośredni, w którym wszystkie obliczenia wykonywane są w całym zakresie częstotliwości z uwzględnieniem korekcji wg krzywej A dla mocy akustycznej źródeł elementarnych.

²⁹ Jeżeli chcemy wyznaczyć L_{AeqT} korzystając z zależności (3.11), to zamiast ciśnienia p podstawiamy jego skorygowaną wartość p_A . We wzorach (3.15-3.24) i (3.26-3.31) należy ponadto wstawić skorygowaną moc akustyczną W_A oraz funkcję propagacji F_p dla częstotliwości dominującej w skorygowanym widmie mocy akustycznej źródła. Dla większości źródeł hałasu środowiskowego jest to wartość z zakresu (500-1000) Hz.

Po podstawieniu wzoru (3.10) do (3.11) oraz uwzględnieniu przemienności dodawania i całkowania otrzymujemy następujące wyrażenie na wypadkowy, ekwiwalentny (za okres T) poziom ciśnienia $L_{eqT,wk}$:

$$L_{eqT,wk} = 10 \lg \left\{ \sum_i^n \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \bar{p}_{ik}^2(t) / p_o^2 dt \right\} . \quad (3.12)$$

Po oznaczeniu

$$L_{eqT,ik} = 10 \lg \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \bar{p}_{ik}^2(t) / p_o^2 dt \right\} , \quad (3.13)$$

otrzymujemy

$$L_{eqT,wk} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1} L_{eqT,ik}, \quad (3.14)$$

gdzie:

$L_{eqT,ik}$ - ekwiwalentny poziom ciśnienia akustycznego wytwarzanego przez i -te źródło składowe.

3.5.1. Reguła generalna

Rozważmy przypadek, gdy na obszarze ZHS występuje N niezależnych źródeł składowych, które należą do różnych klas (def.3.2). Załóżmy, że możliwe jest wyróżnienie N_p jednorodnych podobszarów ZHS (patrz ZG4) i zastąpienie każdego z podobszarów elementarnym źródłem dźwięku S_i (patrz def.3.9). Oznaczmy przez $W_{zT,i}$ równoważną, za okres T , moc akustyczną i -tego elementarnego źródła dźwięku.

Na podstawie def.3.9 oraz wzoru (3.3) zachodzi

$$L_{eqT,ik} \equiv L_{zT,ik} = 10 \lg \left\{ \frac{W_{zT,i}}{W_o} \frac{1}{4\pi r_o^2} F_{pz,ik} \right\} , \quad (3.15)$$

gdzie:

$L_{zT,ik}$ - poziom ciśnienia (w punkcie obserwacji O_k) od elementarnego źródła zastępczego i -tego podobszaru,

$F_{pz,ik}$ - funkcja propagacji między i -tym źródłem elementarnym S_i a punktem obserwacji O_k .

Po podstawieniu (3.15) do (3.14) otrzymujemy następującą regułę generalną dla modelu zastępczego ZHS:

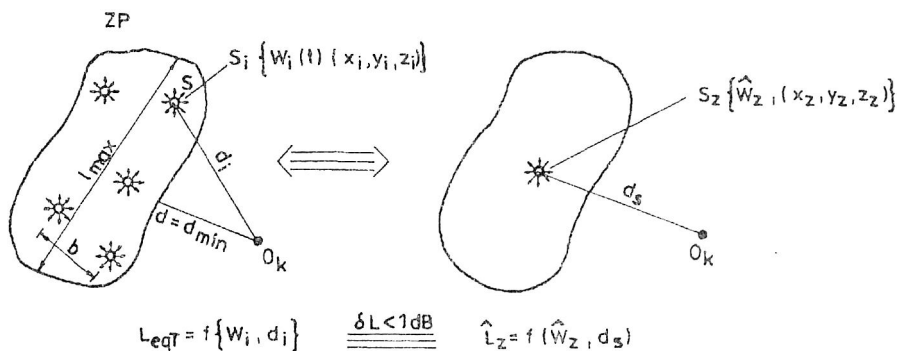
$$L_{eqT,wk} = 10 \lg \left\{ \sum_{i=1}^{N_p} \frac{W_{zT,i}}{W_o} \frac{1}{4\pi r_o^2} F_{pz,ik} \right\} . \quad (3.16)$$

W dalszych rozdziałach przedstawiono³⁰ zasady estymacji równoważnej mocy akustycznej źródła elementarnego (w zależności od rodzaju źródeł składowych), które wynikają z def.3.9 i z właściwości ekwiwalentnego poziomu L_{eqT} (rozdz.3.5.2-3.5.4) oraz kryterium podziału obszaru ZHS na podobszary (rozdz.3.5.5) [142].

3.5.2. Model hałasu elementarnego źródła zastępczego podobszaru ze stacjonarnymi źródłami składowymi

Rozważmy przypadek, gdy na wydzielonym podobszarze A powierzchniowego źródła hałasu środowiskowego znajduje się N niezależnych stacjonarnych źródeł składowych (rys.3.5). Jeżeli warunki propagacji na podobszarze A odpowiadają warunkom przestrzeni otwartej, to z definicji mocy akustycznej wynika zasada superpozycji mocy źródeł składowych. Stąd, po oznaczeniu przez $W_w(t)$ wypadkowej mocy emitowanej z A oraz przez $W_i(t)$ mocy akustycznej i-tego źródła składowego, otrzymujemy [125][142/I]

$$W_w(t) = \sum_i^N W_i(t) \quad (3.17)$$



Rys. 3.5. Zastępcze źródło S_z podobszaru A ze stacjonarnymi źródłami składowymi

Fig. 3.5. Substitute source S_z for subarea A with stationary component sources

Jeżeli w rozpatrywanym odcinku czasu T moce akustyczne źródeł składowych są stałe $W_i = W_{iT} = \text{const}$, a podobszar A spełnia kryterium punktowości (3.22), to na podstawie def.3.5 modelem hałasu źródła elementarnego jest zależność

³⁰ Przedstawione wyniki są syntezą prac prowadzonych przez zespół Środowiskowego Laboratorium Badawczego Hałasów i Wibracji pod kierunkiem autorki w ramach CPBR 11.4 [142].

$$MS_e: W_{zT} = W_{wT} = \sum_i^N W_{iT}, \quad (3.18)$$

w której W_{zT} oznacza moc akustyczną elementarnego źródła podobszaru A, a symbol (T) w indeksie wskazuje, że reguła obowiązuje dla określonego czasu T.

Jeżeli moc akustyczna $W_i(t)$ stacjonarnych źródeł składowych zmienia się w rozpatrywanym okresie T, to na podstawie wzoru (3.11), po uwzględnieniu (3.3) oraz (3.10), wypadkowy ekwiwalentny poziom $L_{eqT,w}$ w otoczeniu podobszaru A wynosi

$$L_{eqT,w} = 10 \lg \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \sum_i^N \frac{W_i(t) Q_i(t)}{W_o} \frac{1}{4\pi r_o^2} F_{p,ik} dt \right\}. \quad (3.19)$$

Po uwzględnieniu, że dla źródeł stacjonarnych $F_{p,ik} = \text{const}$ oraz po oznaczeniu przez $W_{eqT,i}$ równoważnej mocy akustycznej i-tego źródła składowego wg wzoru (3.20)

$$W_{eqT,i} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{W_i(t) Q_i(t)}{W_o} dt, \quad (3.20)$$

otrzymujemy

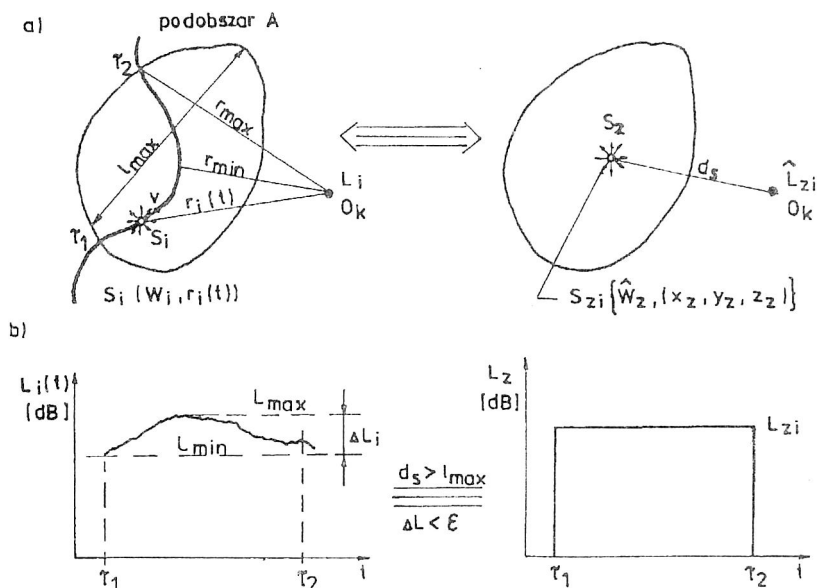
$$L_{eqT,w} = 10 \lg \left\{ \sum_i^N \frac{W_{eqT,i}}{W_o} \frac{1}{4\pi r_o^2} F_{p,ik} \right\}. \quad (3.21)$$

Z zależności (3.21) oraz (3.11)-(3.14) wynika, że dla źródeł stacjonarnych, o mocy akustycznej $W_i(t)$ zmiennej w czasie, zasada superpozycji mocy wyrażona wzorem (3.17) odnosi się do ekwiwalentnych mocy akustycznych $W_{eqT,i}$ źródeł składowych, a model hałasu źródła elementarnego ma postać (por. (3.18)):

$$MS_e: W_{zT} = W_{eqT,w} = \sum_i^N W_{eqT,i}. \quad (3.22)$$

3.5.3. Model hałasu elementarnego źródła dla obszaru z ruchomymi źródłami składowymi

Rozważmy przypadek, gdy na wyróżnionym podobszarze A ZHS występują ruchome źródła składowe. Załóżmy, że źródło punktowe S_i o mocy akustycznej $W_i(t)$ i wskaźniku kierunkowości Q_i porusza się wzdłuż dowolnej trasy (l_i) jak na rys.3.6. Oznaczmy przez τ_1 oraz τ_2 momenty czasu, w których źródło S_i pojawia się na podobszarze A oraz opuszcza ten podobszar.



Rys. 3.6. Zastępcze źródło S_z podobozszaru A, na którym występuje ruchome źródło składowe S_i o stałej mocy akustycznej W ; a) schemat geometryczny, b) poziom ciśnienia/dźwięku w punkcie obserwacji O : $L_i(t)$ - dla źródła S_i , L_z - dla źródła S_z

Fig. 3.6. Substitute source S_z for subarea A on which there occurs the moving component source S_i of constant acoustic power W ; a) geometric diagram, b) sound pressure level or A-weighted sound level at the observation point O : $L_i(t)$ - for source S_i , L_z - for source S_z

Jeżeli przyjmiemy, że źródło punktowe porusza się po płaskiej idealnie odbijającej powierzchni oraz pominiemy efekt Dopplera, efekt unoszenia oraz efekt interferencji między falą bezpośrednią i odbitą, to kwadrat wartości chwilowej ciśnienia akustycznego $p_{ik}^2(t)$ jest wielkością zmienną zależną od wartości chwilowych mocy akustycznej $W_i(t)$ oraz odległości $r_{ik}(t)$ między źródłem S_i i punktem obserwacji O_k w momencie t . Na podstawie wzoru (3.3) $p_{ik}^2(t)$ wynosi

$$p_{ik}^2(t) = W_i(t) Q \rho_0 c / 2\pi r_{ik}^2(t). \quad (3.23)$$

Po uwzględnieniu, iż z założenia³¹

$$\forall [t < \tau_1 \wedge t > \tau_2] \Rightarrow p_{ik}^2(t) = 0,$$

³¹Ruchome źródło składowe przebywa na podobozszarze A tylko w okresie $\Delta t = \tau_2 - \tau_1$.

podstawienie (3.23) do (3.11) daje wyrażenie na ekwiwalentny poziom $L_{eqT,ik}$ za okres $T > \Delta t = \tau_2 - \tau_1$:

$$L_{eqT,ik} = 10 \lg \left\{ \frac{1}{T} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{W_i(t) Q_i(t)}{W_0} \frac{1}{2\pi r_{ik}^2(t)} dt \right\}. \quad (3.24)$$

Po założeniu, że funkcje $W_i(t)$ oraz $r_{ik}(t)$ nie są znane³², rozważmy warunki, dla których prawdziwe jest założenie ZG2 oraz wzór (3.15).

Źródło ruchome o stałej mocy akustycznej $W_i = \text{const}$

Jeżeli w odcinku czasu $\Delta t = \tau_2 - \tau_1$, w którym źródło S_i przebywa na podobszarze A, jego moc akustyczna jest stała ($W_i = \text{const}$), to jak widać ze wzoru (3.23) zmiany poziomu ciśnienia $\Delta L_{p,ik}(t)$ w punkcie O_k są rezultatem zmiany odległości $r_{ik}(t)$ (rys.3.6b).

Jeżeli, dla rozpatrywanych odległości (d) punktów obserwacji od źródła, podobszar A spełnia kryterium (3.32), to zachodzi (rys.3.6a)

$$r_{\min}(t) \approx r_{\max}(t) \approx \text{const},$$

oraz

$$\forall [\tau_1 < t < \tau_2]: \Delta L_{p,ik} = (L_{p,\max} - L_{p,\min}) \leq \epsilon \Rightarrow L_{p,ik}(t) \approx \text{const}, \quad (3.25)$$

przy czym; $L_{p,\max}$ i $L_{p,\min}$ oznaczają odpowiednio, największą oraz najmniejszą wartość zmiennego w czasie poziomu ciśnienia $L_{p,ik}(t)$.

Z tego wynika, że dla przyjętych założeń składowe źródło S_i , które porusza się po podobszarze A, jest przyczyną elementarnego zdarzenia akustycznego o następujących parametrach (rys.3.6b):

- czas trwania: $\Delta t_i = \tau_2 - \tau_1$,
- moc akustyczna $W_{zi} = W_i = \text{const}$.

Wykazano zatem, że model hałasu źródła elementarnego obszaru z ruchomymi źródłami składowymi jest taki sam jak dla podobszaru, na którym

³² Szczególnym przypadkiem składowego źródła ruchomego jest punktowe, wszechkierunkowe źródło o stałej mocy akustycznej W , które porusza się wzdłuż linii prostej ze stałą prędkością V . Zachodzą wtedy proste relacje między parametrami swobodnego pola akustycznego a parametrami źródła. Po podstawieniu: $W_i = \text{const}$ oraz $r_{ik}^2(t) = d^2 + (Vt)^2$ do (3.24) uzyskuje się jawną postać wyrażenia dla L_{eqT} [45][46][63]

$$L_{eqT} = L_W - 10 \lg(dVT) + 10 \lg(\alpha_{12}/2\pi),$$

w której: L_W - poziom mocy akustycznej źródła, d - odległość punktu obserwacji od linii ruchu, α_{12} - kąt widzenia odcinka drogi, jaką przebyło źródło w czasie T .

występują zdeterminowane zdarzenia akustyczne, opisany wzorem (3.28) w rozdz. 3.6.4.

Źródło ruchome o zmiennej mocy akustycznej $W(t)$

Jeżeli w okresie $\Delta t = \tau_2 - \tau_1$ moc akustyczna ruchomego źródła składowego S_i jest zmienna, $W_i(t) \neq \text{const}$, to po uwzględnieniu (3.15) na podstawie (3.19–3.21) oraz (3.24) zachodzi:

$$MS_e: W_{zi} = W_{z\Delta t, i} = W_{eq\Delta t, i}, \quad (3.26)$$

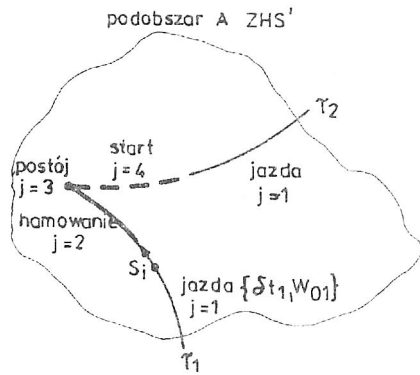
gdzie:

$W_{z\Delta t, i}$ – moc akustyczna i -tego elementarnego źródła w okresie Δt ,
 $W_{eq\Delta t}$ – ekwiwalentna moc akustyczna i -tego ruchomego źródła składowego za okres Δt wg (3.20), przy czym: $t_2 = \tau_2$, $t_1 = \tau_1$.

W rozważanej klasie ruchomych źródeł składowych, które występują na obszarze ZHS (pojazdy samochodowe, tramwaje, pociągi), zmiana mocy akustycznej źródła jest związana na ogół z fazami ruchu, np. start pojazdu, jazda, hamowanie itp. (rys. 3.7). Założmy zatem, że zmiana mocy akustycznej źródła składowego S_i jest wynikiem zmiany parametrów operacyjnych źródła. Ruch źródła składowego na obszarze A można zatem rozpatrywać jako sekwencję niezależnych operacji podstawowych (rys. Rys. 3.7. Podobszar A z ruchomym źródłem składowym o zmiennej mocy akustycznej $W(t)$ – przykładowy podział na operacje podstawowe o stałej mocy W_{oj} Fig. 3.7. Subarea A with moving component source of variable acoustic power $W(t)$ – exemplary division into basic operations of constant acoustic power W_{oj}

Jeżeli na podobszarze A w czasie T porusza się N źródeł składowych, a ruch każdego źródła składowego można rozłożyć na J różnego typu operacji podstawowych, to na podstawie (3.15), (3.18) i (3.24) moc akustyczna W_z źródła zastępczego podobszaru A wynosi:

$$MS_e: W_z = W_{eqT} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \delta t_{ij} W_{oij}. \quad (3.27)$$



3.5.4. Model hałasu elementarnego źródła zastępczego obszaru, na którym występują zdarzenia akustyczne

Rozważmy przypadek, gdy na wybranym podobszarze A występują zdarzenia akustyczne związane z krótkotrwałą emisją dźwięku. Założmy, że czas trwania i-tego zdarzenia wynosi Δt_i a jego moc akustyczna W_i jest stała.

Zdarzenia zdeterminowane

Jeżeli w odcinku czasu T na podobszarze A wystąpi N zdarzeń akustycznych, to na podstawie def.3.6, po uwzględnieniu zależności (3.15), (3.18) i (3.24), moc akustyczna W_z elementarnego źródła dla podobszaru A wynosi:

$$MS_e: W_z = W_{eq,T} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N \Delta t_i W_i. \quad (3.28)$$

Jeżeli zdarzenia elementarne są jednakowe, tzn. $\Delta t_i = \Delta t$ oraz $W_i = W$, to wyrażenie (3.28) upraszcza się do postaci:

$$MS_e: W_z = W_{eqT} = N (\Delta t/T) W. \quad (3.28a)$$

Zdarzenia akustyczne losowe

Rozpatrzmy przypadek, gdy czas trwania (Δt_i) i-tego zdarzenia akustycznego (pewnego rodzaju) oraz jego moc akustyczna W_i mają charakter losowy. Jeżeli na wartości Δt_i i W_i wpływa duża liczba czynników niezależnie działających, z których każdy ma porównywalny efekt, to w praktyce można przyjąć, że wielkości Δt i W są zmiennymi losowymi o rozkładzie normalnym $N(m, \sigma)$ ³³:

$$\Delta t: N(\bar{\Delta t}, \sigma_t) , \quad (3.29a)$$

$$W: N(\bar{W}, \sigma_w) . \quad (3.29b)$$

Jeżeli zmienne losowe (Δt) i (W) są niezależne, to z (3.28) wynika, że równoważna moc akustyczna $W_{eqT,j}^z$ pojedynczego zdarzenia akustycznego jest wartością losową, która należy do rozkładu o wartości średniej³⁴:

$$\bar{W}_{eqT}^z = \bar{\Delta t} \bar{W} / T, \quad (3.30a)$$

oraz odchyleniu standardowym σ_{we}^z :

$$\sigma_{we}^z = \frac{1}{T} \left(\sigma_t^2 \sigma_w^2 + \bar{\Delta t}_i^2 \sigma_w^2 + \bar{W}_i^2 \sigma_t^2 \right)^{1/2} . \quad (3.30b)$$

³³Rozkład normalny, o średniej wartości m i odchyleniu standardowym σ .

³⁴Poradnik matematyczny, Praca zbiorowa pod redakcją I. Dziubińskiego i T.Świątkowskiego, PWN, Warszawa 1980.

Ekwiwalentna moc akustyczna W_{eqT} zastępczego źródła S_e podobszaru A jest także zmienną losową. Zakładając, że rozkład zmiennej losowej W_{eqT} jest rozkładem normalnym, modelem hałasu źródła S_e jest w tym przypadku zależność:

$$MS_e: \{ W_{eqT}: N(\bar{W}_{eqT}, \sigma_{we}) \}, \quad (3.31)$$

w której $\bar{W}_{eqT}$ oznacza wartość średnią rozkładu, a σ_{we} jest odchyleniem standardowym.

W przypadku gdy na rozważanym podobszarze A występują niezależne zdarzenia akustyczne jednego rodzaju, parametry rozkładu W_{eqT} wynoszą:

$$\bar{W}_{eqT} = N \cdot \bar{W}_{eqT}^Z, \quad \sigma_{WT} = \sqrt{N \cdot \sigma_{we}^Z} \quad (3.31a)$$

gdzie N - liczba zdarzeń w okresie T.

Jeżeli zdarzenia akustyczne są różnego rodzaju, to:

$$\bar{W}_{eqT} = \sum_{j=1}^J \bar{W}_{eqT,j}^Z, \quad \sigma_{WT} = \left(\sum_{j=1}^J (\sigma_{we,j}^Z)^2 \right)^{1/2}, \quad (3.31b)$$

przy czym: $\bar{W}_{eqT,j}^Z$ i $\sigma_{we,j}^Z$ dane są wzorami (3.30a) i (3.30b) odpowiednio, J - liczba rodzajów zdarzeń.

Błąd oszacowania mocy akustycznej podobszaru A, na którym występują losowe zdarzenia akustyczne, jest znacznie większy niż dla zdarzeń zeterminowanych.

3.5.5. Model struktury ZHŚ

W modelu zastępczym ZHŚ wszystkie elementarne źródła dźwięku są źródłami stacjonarnymi. Jeżeli na obszarze ZHŚ występują stacjonarne źródła składowe, model struktury jest odwzorowaniem rzeczywistego rozkładu źródeł składowych. Jeżeli na obszarze ZHŚ występują ruchome źródła składowe oraz zdarzenia akustyczne, rozkład oraz liczba elementarnych źródeł zależy od sposobu dyskretyzacji obszaru ZHŚ na jednorodne podobszary, który wynika z przyjętych założeń ZG1, ZG2, ZG4, def.3.6 oraz charakterystyki funkcjonalnej modelowanego obiektu. Sposób podziału obszaru ZHŚ na podobszary ustala się indywidualnie dla każdego typu obiektu, uwzględniając kryteria punktowości (patrz ZG1, def.3.6) i jednorodności warunków emisji do otoczenia (patrz ZG2 i (3.15)) podane poniżej.

Kryterium "punktowości" źródeł powierzchniowych

Teoretyczne źródło punktowe oraz wszechkierunkowe jest nieskończenie małą pulsującą kulą, o promieniu $r_0 \rightarrow 0$. Charakterystyczną cechą swobodnego pola akustycznego źródła punktowego jest 6 dB spadek poziomu

ciśnienia akustycznego na każde podwojenie odległości d od źródła. Rzeczywiste źródło dźwięku S można uważać za punktowe, gdy pole akustyczne w rozważanym obszarze obserwacji wykazuje cechy właściwe dla takiego źródła. Zachodzi to, gdy odległość punktu obserwacji d od źródła jest dużo większa od jego wymiarów liniowych l_s oraz od długości fali akustycznej λ :

$$(d \gg l_s, \text{ tak że } l_s \rightarrow 0) \text{ oraz } (d \gg \lambda) . \quad (3.32)$$

Przy formułowaniu modeli zastępczych źródeł powierzchniowych ważne jest ustalenie ilościowych relacji między d i l_s , które spełniają jakościowy warunek (3.32). Za miarę dokładności odwzorowania pola akustycznego przyjmuje się na ogół różnicę δL między poziomem ciśnienia akustycznego wytworzonego przez rzeczywiste źródło hałasu (L_r) oraz przez zastępcze źródło elementarne (L_z).

Z przeprowadzonych w pracach [125][142] badań symulacyjnych³⁵ rozkładu pola akustycznego wokół źródła powierzchniowego (ZP) ze stacjonarnymi źródłami składowymi wynika, że wartość różnicy δL zależy od wymiarów liniowych i kształtu ZP, odległości b między źródłami składowymi, a także usytuowania punktu obserwacji względem obrysu ZP (patrz rys.3.8). Z badań tych wynika, że geometryczna strefa daleka, w której poziom dźwięku maleje 6 dB na podwojenie odległości, występuje gdy odległość d_s między punktem obserwacji a środkiem geometrycznym obszaru jest większa od maksymalnego wymiaru liniowego źródła $l_{\max}$. Na podstawie tych badań do celów modelowania ZHS przyjęto następujące kryterium punktowości ZP:

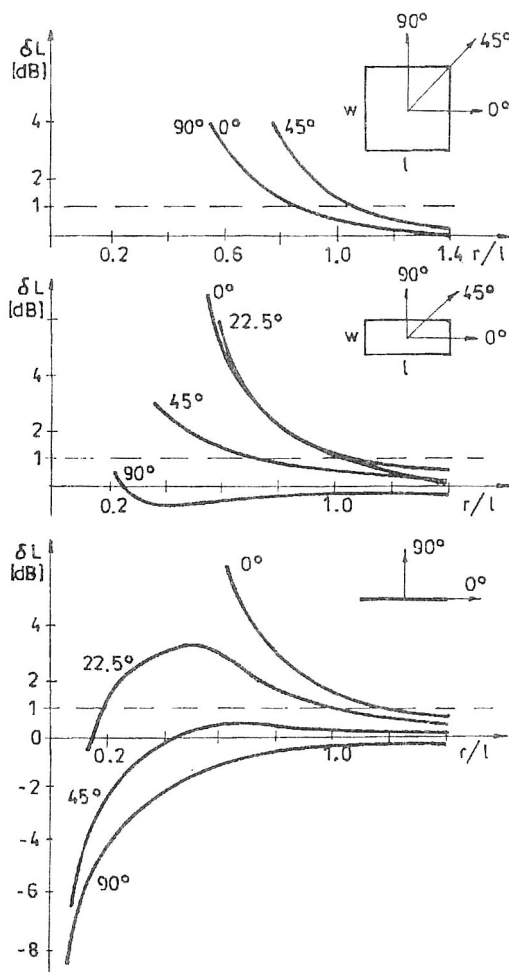
$$d_s \geq l_{\max} \Rightarrow \delta L \leq 1 \text{ dB} . \quad (3.33)$$

Kryterium jednorodności emisji

W modelu zastępczym tłumienie energii akustycznej, emitowanej z wybranego i -tego podobszaru ZHS, która dociera do punktu obserwacji O_k , opisuje funkcja propagacji F_{pik} wyznaczana dla zastępczego źródła elementarnego S_i umieszczonego w środku geometrycznym wyróżnionego podobszaru. Po uwzględnieniu ZG2 oraz (3.15) sformułowano następujące kryterium jednorodności emisji z podobszaru ZHS:

$$\delta L_i = |10 \lg(F_{pik}) - 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (F_{pjk}) \right)| < 1 \text{ dB} , \quad (3.34)$$

³⁵ Analityczne rozwiązanie problemu uzyskano dla ograniczonej klasy źródeł i położeń punktów obserwacji [98][131]. Dla źródła liniowego o skończonej długości l , dla punktów obserwacji położonych w odległości d na osi symetrii źródła, kryterium punktowości jest spełnione, gdy $d > 0,5l$. Dla źródła powierzchniowego w kształcie koła o promieniu R rozwiązanie analityczne uzyskano tylko dla punktów położonych na przekroju prostopadłym do powierzchni źródła, przechodzącym przez środek koła. Kryterium punktowości spełnione jest dla $d > R$ [98].



Rys. 3.8. Poprawka δL na kształt oraz wymiary źródła powierzchniowego w funkcji stosunku $r/l_{\max}$; r - odległość: punkt obserwacji O - zastępcze źródło S_z , $l_{\max}$ - największy wymiar liniowy źródła [125]

Fig. 3.8. Correction δL for the shape and dimensions of plane source as a function of $r/l_{\max}$ ratio, r - distance between the observer O and substitute point source S_z , $l_{\max}$ - the greatest line dimension of plane source [125]

gdzie:

F_{pjk} - funkcja propagacji dla j -tego źródła składowego występującego na i -tym podobszarze.

W warunkach przestrzeni otwartej kryterium (3.34) jest zawsze spełnione, jeżeli spełnione jest kryterium (3.33). W warunkach przestrzeni ograniczonej, gdy występują zjawiska odbicia i dyfrakcji, relacje między wymiarami geometrycznymi ZHS a odległością i położeniem punktu obserwacji są bardziej złożone.

3.6. Wnioski końcowe

Koncepcja ogólna modelowania ZHS dotyczy źródeł hałasu ze stacjonarnymi oraz ruchomymi (zorganizowanymi i niezorganizowanymi) źródłami składowymi. W czasie modelowania konieczne jest zatem stosowanie technik deterministycznych i probabilistycznych.

Skonstruowanie modelu ZHS jest możliwe, jeżeli:

- można zidentyfikować położenie źródeł elementarnych,
- możliwe jest określenie mocy akustycznej źródeł elementarnych,
- prawdziwe jest założenie o wzajemnej niezależności źródeł elementarnych (co umożliwia zastosowania zasady superpozycji kwadratów ciśnień w celu wyznaczania poziomu wypadkowego).

Do opisu ZHS z ruchomymi źródłami składowymi, których ruch jest zdeterminowany, lepsze jest stosowanie dynamicznych modeli symulacyjnych.

Modelowanie symulacyjne źródeł o cechach probabilistycznych wymaga posługiwania się pewnymi statystykami, np. rozkładami odstępów czasu Δt między zdarzeniami akustycznymi, których typy i parametry powinny być znane, co często stanowi barierę w praktycznym stosowaniu tej techniki modelowania.

W przypadku złożonych układów, gdzie nie jest możliwe symulowanie dynamicznych zmian lub nie ma możliwości identyfikacji zmian charakterystyk akustycznych rzeczywistych źródeł dźwięku, lepsze jest stosowanie modeli stacjonarnych z równoważnymi źródłami zastępczymi.

4. MODEL SYMULACYJNY HAŁASU ARTERII KOMUNIKACYJNEJ

4.1. Wprowadzenie

Zagadnienie modelowania źródła hałasu drogowego, ze względu na powszechność występowania tego hałasu oraz znaczną jego uciążliwość, ma bogatą literaturę. Badania idące w kierunku opracowania metod prognozowania hałasu drogowego podjęto w wielu krajach już na przełomie lat 60. i 70. [1][9][10][25][27][44][69][79][82][83][119][134][135][137][161][165][167][177][186][189][191]. W Polsce badania w tym zakresie podjęte zostały najwcześniej w Instytucie Techniki Budowlanej w Warszawie [151][152][153][161], a następnie w Instytucie Ochrony Środowiska w Warszawie [46][79] oraz w Instytucie Akustyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza (IA UAM) w Poznaniu [66][67][102][104][106]. Metody prognozowania opracowane w pierwszych dwóch ośrodkach opierają się głównie na wynikach szeroko zakrojonych badań eksperymentalnych³⁶, natomiast metoda IA UAM na analitycznym rozwiązaniu problemu. Relatywne opóźnienie w odniesieniu do możliwości symulacyjnego prognozowania hałasu ruchu drogowego przy krajowej strukturze środków transportu było przyczyną podjęcia tego tematu przez autorkę [134][135][137].

Problemem teoretycznego określenia związków pomiędzy sytuacją w ruchu a wytwarzanym poziomem dźwięku hałasu drogowego zajmowali się między innymi: Johnson i Sanders [69], Scholes i Sargent [165], Kurze [82][83], Blitz [10], Takagi [177], Blandamura i Spagnolo [9], Yeow [189][191], Makarewicz [102][106], Ohta [153], Diggory i Oakes [27].

W metodologicznym ujęciu tego zagadnienia można wyróżnić występujące wyraźnie tendencje.

Przyjmowanie prostego deterministycznego modelu swobodnego przepływu strumienia pojazdów na prostym odcinku drogi. W modelach tych nieskończona liczba punktowych niekoherentnych źródeł hałasu porusza się ze stałą prędkością, w stałych równych odstępach, promieniując taką samą moc akustyczną [9][10][69][82][83][127]. Modele te umożliwiają sformułowanie analitycznych zależności pomiędzy parametrami charakteryzującymi ruch na odcinku drogi a wynikowym parametrem oceny klimatu akustycznego. W tym okresie, ze względu na brak jednolitych międzynarodowych ustaleń normalizacyjnych

³⁶Ustalono zależności empiryczne, które pozwalają oszacować poziomy statystyczne L_{A10} i L_{A50} hałasu drogowego [152][161], a także ekwiwalentny poziom L_{AeqT} [79], w zależności od parametrów ruchu drogowego (patrz rozdz.1.1).

zacyjnych, za parametr oceny hałasu komunikacyjnego przyjmowano poziom średni $\langle L_A \rangle$ [69][127] lub poziom quasi-maksymalny L_{A10} [9][10][82][83].

Istnieją modele ruchu na odcinku drogi znacznie bliższe rzeczywistości, tzn. uwzględniające probabilistyczny charakter takich parametrów, jak: skład pojazdów, odstępów pomiędzy kolejnymi pojazdami, moce akustyczne poszczególnych pojazdów oraz prędkości ruchu [21][153][177][189][191]. W początkowej fazie formułowania modeli tej grupy przyjmowano najczęściej tylko jedną charakterystykę probabilistyczną (np. rozkład odstępów między pojazdami) [82][83][189][191], a pozostałe parametry przyjmowano w ujęciu deterministycznym. Równoczesne uwzględnienie wszystkich probabilistycznych charakterystyk parametrów ruchu komplikuje zależności analityczne, co implikuje tworzenie modeli symulacyjnych z ograniczeniem związków deterministycznych wyłącznie do propagacji fali akustycznej w otoczeniu [27][44][64][72][186].

Wyświetlenie charakteru zjawisk elementarnych, które towarzyszą powstawaniu hałasu drogowego, a także przyjęcie w normalizacji międzynarodowej poziomu ekwiwalentnego L_{AeqT} jako podstawowego wskaźnika oceny hałasu [57], spowodowało, że w najnowszych pracach występuje tendencja do tworzenia modeli hałasu drogowego w zgodzie z zasadą superpozycji zdarzeń elementarnych związanych z przejazdem pojedynczego pojazdu [21][67][108-111].

Przedstawiony w niniejszej pracy model symulacyjny hałasu arterii komunikacyjnej jest dyskretnym modelem probabilistycznym, który symuluje rzeczywisty ruch pojazdów samochodowych na prostym odcinku drogi, z uwzględnieniem probabilistycznych charakterystyk opisujących warunki ruchu oraz deterministycznych zależności opisujących warunki propagacji w przestrzeni swobodnej. W przyjętej koncepcji dynamicznego modelu symulacyjnego (rozdz.3.4) identyfikacja położenia źródeł elementarnych dla każdego momentu czasowego t_n jest realizowana przez symulację ruchu pojazdów na wielopasmowym, prostoliniowym odcinku drogi (rozdz.4.3). W celu identyfikacji mocy akustycznej elementarnych źródeł dźwięku sformułowany został empiryczny model hałasu pojedynczego pojazdu samochodowego, który porusza się w swobodnym strumieniu ruchu. Model ten wiąże skorygowany poziom mocy akustycznej L_{WA} pojazdu z jego klasą k i prędkością ruchu V (rozdz. 4.4). Model hałasu pojedynczego pojazdu ustalony został na podstawie własnych badań empirycznych, gdyż mimo obszernego oparcia na danych literaturowych [21][93][69][118][136][152][161] empiryczne parametry modelu muszą być dostosowane do warunków krajowych³⁷, tak aby model był weryfikowalny.

³⁷ Wyniki badań krajowych, prowadzonych głównie przez Instytut Transportu Samochodowego [161] nie znajdują zastosowania w prezentowanej metodzie, gdyż wykonywane są w warunkach testowych określonych PN-71/S-04051.

Szczegółowy opis modelu oraz wyników badań empirycznych można znaleźć w pracy [137].

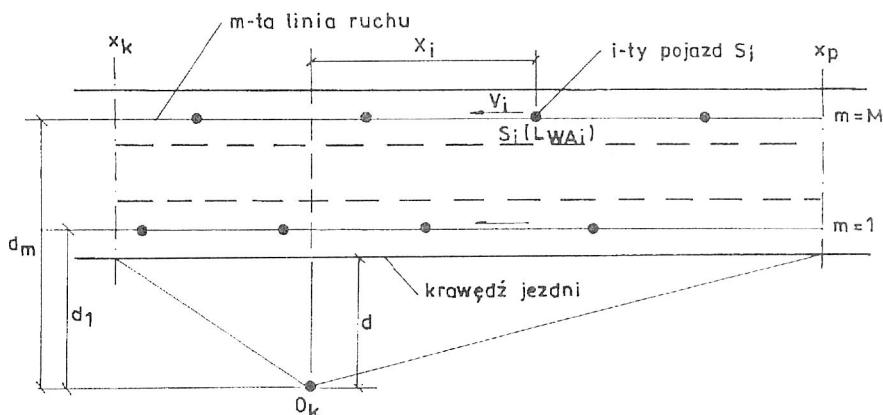
4.2. Założenia modelu. Reguła generalna

Założenia modelu źródła hałasu drogowego, wynikające z przyjętej koncepcji ogólnej modelowania ZHS przedstawionej w rozdz.3 oraz ukierunkowania na cele praktyczne, są następujące:

- model opisuje sytuację drogową na prostym odcinku wielopasmowej arterii komunikacyjnej,
- rozważania ogranicza się do przypadku propagacji fali akustycznej w przestrzeni otwartej nad powierzchnią idealnie odbijającą,
- parametrami wejściowymi modelu są wielkości opisujące ruch na odcinku drogi stosowane w projektowaniu dróg, takie jak: natężenie ruchu, prędkość pojazdów w strumieniu ruchu, procentowy udział pojazdów różnych klas, oraz parametry opisujące geometrię arterii takie jak: liczba pasów ruchu, szerokość pasów, szerokość pasa rozdzielu,
- parametrami wyjściowymi modelu jest zbiór parametrów oceny klimatu akustycznego [57], które wyznaczamy na podstawie wartości chwilowych poziomu dźwięku $L_A(t)$ uzyskanych w procesie symulacji [137]:

$$\{ L_{AeqT}, L_{A10}, L_{A50}, L_{A90} \}.$$

Punktem wyjścia do sformułowania modelu symulacyjnego ruchu na odcinku drogi jest ustalenie dającego się sformalizować opisu sytuacji drogowej. Schemat sytuacji drogowej przedstawia rys.4.1.



Rys. 4.1. Schemat sytuacji drogowej w modelu symulacyjnym [137]

Fig. 4.1. Geometry of a road situation for a simulation model [137]

Warunki ruchu na odcinku drogi zostały określone następująco:

- na skończonym odcinku drogi jest M niezależnych pasów ruchu,
- pojazdy znajdujące się na m -tym pasie poruszają się wzdłuż jego osi, tworząc strumień o swobodnym przepływie ciągłym (nie uwzględnia się hamowania oraz przyspieszania pojazdów),
- na odcinku drogi pojazdy nie zmieniają pasa ruchu, lecz mogą się wyprzedzać,
- na odcinku drogi poszczególne pojazdy poruszają się ze stałą własną prędkością V_i , a zbiór wartości $\{V_i\}$ jest rozkładem normalnym $N(\langle V \rangle, \sigma_V)$ ³⁸ ograniczonym do zadanych wartości $V_{\min}$, $V_{\max}$,
- odstęp czasowy τ_i pomiędzy pojawieniem się kolejnych pojazdów na m -tym pasie w dowolnym przekroju odcinka drogi jest zmienną losową z rozkładu Poissona o wartości oczekiwanej $\mu_\tau = 1/Q_m$, gdzie Q_m jest natężeniem ruchu na m -tym pasie.

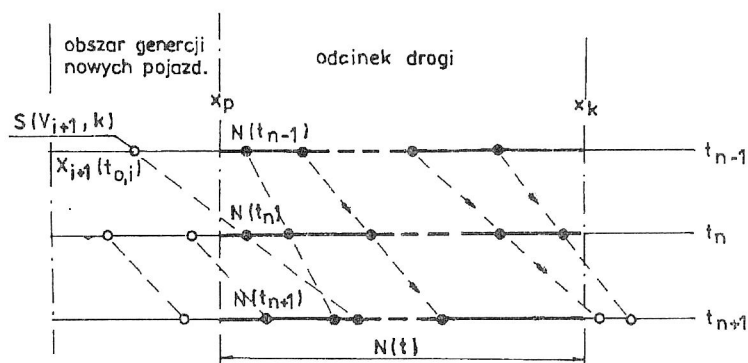
Przyjęte założenia pozwalają na ustalenie deterministycznych reguł opisujących ruch poszczególnych pojazdów, który odbywa się zgodnie z prawem ruchu jednostajnego po linii prostej (osi pasa), lecz równocześnie umożliwia odtworzenie losowego rozkładu pojazdów na odcinku drogi w każdym momencie czasu t_n , przez zadanie losowych wartości prędkości V_i i interwałów czasowych τ_i . Ideę symulacji ruchu pojazdów zilustrowano na rys.4.2. Reguły sformułowanego modelu struktury źródła omówiono szerzej w rozdz.4.4.

W celu ustalenia zależności między parametrami funkcjonalnymi stanu źródła (def.3.4), które charakteryzują sytuację w ruchu, a skorygowaną mocą akustyczną W_A źródeł elementarnych (ZG2 - rozdz.3.3.1) przyjęto następujące założenia:

- pojazdy samochodowe stanowią punktowe, wszechkierunkowe źródła dźwięku³⁹ (ZG1, ZG2 - rozdz.3),
- moc akustyczna W_A źródła elementarnego (pojazdu) zależy od klasy k pojazdu oraz jego prędkości ruchu V i jest wartością losową,
- ze względu na moc akustyczną W_A oraz prędkość ruchu V , każdy pojazd można zakwalifikować do skończonej liczby klas,

³⁸ Założenie powyższe potwierdziły wyniki badań własnych [137]. W literaturze dotyczącej projektowania dróg nie znaleziono konkretnych danych pozwalających na oszacowanie parametrów rozkładu prędkości ruchu z uwzględnieniem podziału pojazdów na klasy. W związku z tym wartości $\langle V \rangle$ i σ_V dla poszczególnych klas pojazdów oraz relacje między nimi w zależności od typu arterii oszacowano na podstawie badań własnych [137].

³⁹ Analiza porównawcza modeli źródła punktowego wszechkierunkowego oraz dipolowego w odniesieniu do pojazdów samochodowych przedstawiona w [36] wskazuje, że w tym przypadku model źródła wszechkierunkowego jest adekwatny.



Rys. 4.2. Ilustracja zasady symulacji ruchu pojazdów w dynamicznym modelu symulacyjnym; (•) - pojazdy znajdujące się na obserwowanym odcinku drogi $\{x_p, x_k\}$, (◦) - pojazd "poza" odcinkiem drogi

Fig. 4.2. The principle of vehicle traffic simulation in a model; (•) - vehicles in the observed road section $\{x_p, x_k\}$, (◦) - vehicle outside the road section

- poziom mocy akustycznej L_{WAik} i-tego pojazdu, należącego do k-tej klasy, jest zmienną losową z rozkładu normalnego $N(\bar{L}_{Wk}, \delta_k)$.

Założenie dotyczące mocy akustycznej pojazdów przyjęto opierając się na wynikach badań prezentowanych w literaturze przedmiotu [18][93][94][118][161] oraz na wynikach badań własnych [136][137], z których wynika, że wprowadzić istnieje silna zależność pomiędzy poziomem dźwięku hałasu generowanego przez pojazdy poruszające się w swobodnym strumieniu ruchu a prędkością jazdy, jednak hałas ten zależy od tak wielu czynników, iż w praktyce ma charakter zmiennej losowej. Wyniki własnych badań eksperymentalnych przedstawiono szerzej w rozdz.4.4.

Reguła generalna

Dla sytuacji drogowej, jak na rys.4.1. oraz przyjętych założeń szczegółowych, reguła generalna (3.7) modelu symulacyjnego hałasu drogowego dla prostego odcinka arterii komunikacyjnej ma postać (4.1):

$$L_A(t_n) = 10 \lg \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_{pm}(t_n)} \frac{W_{Aim}(V_i, k_i) S_o}{W_o 2\pi(d_m^2 + x_{im}^2(t_n))} \right\} \quad (4.1)$$

gdzie:

M - liczba pasów ruchu;

- $N_{pm}(t_n)$ - liczba źródeł elementarnych znajdujących się w momencie t_n na m -tym pasie odcinka drogi o zadanej długości l , zmienna losowa wyznaczana wg reguły (4.4) modelu struktury ZHŚ (rozdz.4.3);
 W_{Aim} - moc akustyczna i -tego źródła elementarnego znajdującego się w momencie t_n na m -tym pasie ruchu odcinka drogi, zmienna losowa generowana wg reguły (4.8) modelu hałasu źródła elementarnego;
 d_m - prostopadła odległość punktu obserwacji O_k od m -tej linii ruchu;
 $x_{im}(t_n)$ - położenie i -tego źródła elementarnego w momencie t_n na m -tym pasie ruchu odcinka drogi, wyznaczane na podstawie reguł (4.2) i (4.3) modelu struktury ZHŚ (rozdz.4.4),
 S_o - powierzchnia odniesienia, $S_o = 1 \text{ m}^2$.

4.3. Model symulacyjny struktury ZHŚ

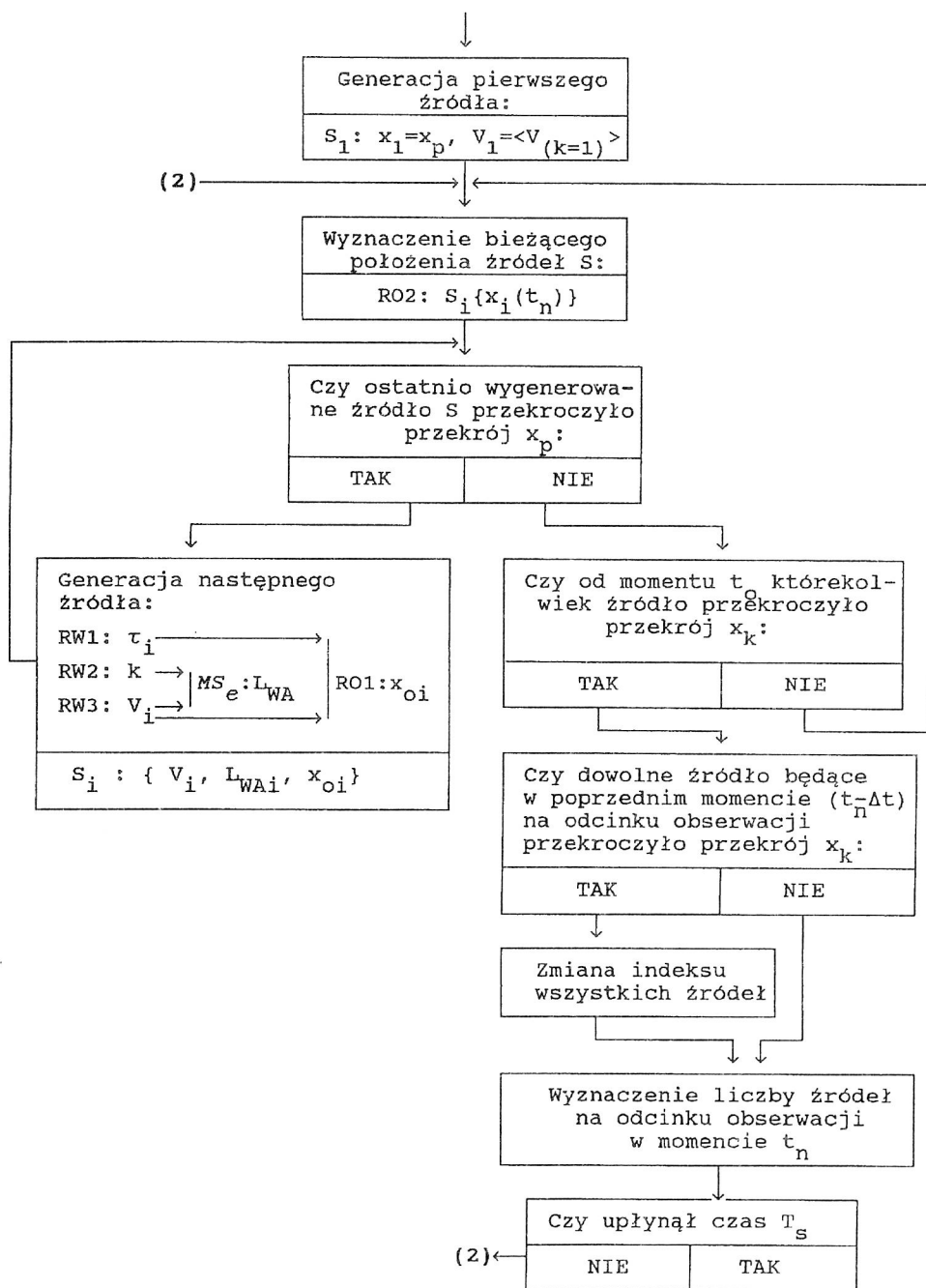
Model struktury ZHŚ (def.3.6), który sformułowano dla odcinka drogi na podstawie przyjętych w rozdz.4.2 założeń, jest zbiorem reguł będących zależnościami deterministycznymi, związkami probabilistycznymi oraz regułami decyzyjnymi. Symulują one ruch źródeł punktowych na odcinku drogi (reguły organizacyjne RO) oraz generują rozkłady, co do których przyjęto założenia o ich losowości (reguły wewnętrzne RW). Podczas formułowania reguł organizacyjnych opierano się m.in. na pracach Millera, Weissa oraz Varola i innych dotyczących właściwości statystycznych rozkładów parametrów ruchu [137][180].

W modelu wszystkie operacje związane z wykonywaniem reguł symulujących ruch źródeł punktowych oraz ustaleniem parametrów stanu źródła zachodzą dla kolejnych dyskretnych wartości czasu t_n , oddalonych od siebie o Δt , w ustalonym okresie obserwacji T .

Generacja źródeł elementarnych rozpoczyna się w momencie $t = 0$ i obejmuje wygenerowanie:

- interwału czasu τ_i pojawienia się i -tego źródła w przekroju początkowym odcinka drogi ($x = x_p$) - reguła RW1 (4.5),
- klasy k źródła - reguła RW2 (4.6),
- prędkości V_i - reguła RW3 (4.7),
- poziomu mocy akustycznej L_{WAi} - na podstawie modelu hałasu źródła elementarnego (4.8).

Stosowanie reguły generalnej RG1 (4.1) i związana z tym generacja hałasu w punkcie obserwacji O rozpoczyna się w momencie t_p , tzn. w momencie, gdy przyjęty odcinek obserwacji zostanie nasycony źródłami punktowymi. Czas t_p wyznaczony jest przez moment opuszczenia odcinka obserwacji przez pierwsze źródło elementarne. Symulacja ruchu zachodzi do momentu $T = t_p + T_s$, gdzie T_s jest założonym czasem obserwacji. Na rysunku 4.3 pokazano schemat blokowy modelu symulacyjnego hałasu arterii komunikacyj-



Rys. 4.3. Schemat blokowy modelu struktury źródła hałasu drogowego
 Fig. 4.3. Block diagram of the model of traffic noise source structure

nej, uwzględniający podstawowe bloki funkcjonalne oraz następstwa wykonywania reguł.

Reguły organizacyjne

Reguła RO1, generująca początkowe położenie, $x_{i+1}(t_{o,i})$, $(i+1)$ -tego źródła elementarnego względem położenia $x_i(t_{o,i})$ i -tego źródła, przy czym $x_1(t=0) = x_p$:

$$\text{RO1:} \quad x_{i+1}(t_{o,i}) = x_i(t_{o,i}) + v_{i+1} \tau_{i+1}, \quad (4.2)$$

gdzie:

$t_{o,i}$ - moment generowania $(i+1)$ źródła elementarnego, czyli moment, w którym przy przyjętym czasie dyskretyzacji Δt stwierdzono, że i -ty pojazd przekroczył przekrój początkowy odcinka drogi $x = x_p$,

v_{i+1} - prędkość $(i+1)$ -tego źródła elementarnego wg RW3 (4.7),

τ_{i+1} - interwał czasowy wygenerowany z RW1 (4.5).

Reguła RO2, generująca bieżące położenie i -tego źródła (reguła rekurencyjna):

$$\text{RO2:} \quad n \in \bigwedge_{\{1,N\}} \left\{ x_i(t_n) = x_i(t_n - \Delta t) - v_i \Delta t \right\}, \quad (4.3)$$

gdzie: $N = T / \Delta t$

Reguła RO3, sprawdzająca położenie każdego pojazdu na linii ruchu oraz wyznaczająca liczbę $N_p(t_n)$ pojazdów znajdujących się w momencie t_n na obserwowanym odcinku drogi o zadanej długości $l = (x_k - x_p)$:

$$\text{RO3:} \quad n \in \bigwedge_{\{1,N\}} \bigwedge_{i \in S} \left\{ \{x_i(t_n) : [x_i(t_n) \in (x_p, x_k)] \Rightarrow (i \in N_p(t_n))\} \right\}, \quad (4.4)$$

gdzie:

$N_p(t_n) = SbS$, $N_p(t_n)$ stanowi podzbiór zbioru $\{S\}$ w sensie podanej reguły implikacyjnej (4.4).

$\{S\}$ - zbiór pojazdów samochodowych.

Reguły wewnętrzne RW

Reguła RW1, generująca rozkład $p(\tau_i)$ interwałów czasowych τ_i pojawiania się źródeł elementarnych w przekroju początkowym ($x = x_p$) odcinka obserwacji na m -tej linii ruchu:

$$\text{RW1:} \quad p(\tau) \bigvee_{\in P(\mu_{\tau m})} \bigwedge_{i \in S} \{\tau_i : P_m(\tau)\}, \quad (4.5)$$

gdzie:

$P(\mu_{tm})$ - rozkład Poissona o wartości oczekiwanej $\mu_{tm} = 1/Q_m$,

Q_m - natężenie strumienia źródeł elementarnych na linii m.

W późniejszej pracy Jacobs [60] wykazał, że w przypadku symulacji hałasu dla swobodnego przepływu strumienia pojazdów typ przyjętego rozkładu $p(\tau)$ nie wpływa w istotny sposób na generowany rozkład poziomów dźwięku.

Reguła RW2, generująca dyskretny rozkład prawdopodobieństwa pojawienia się źródeł punktowych w k-tej klasie:

$$RW2: \bigwedge_{i \in W} \bigvee_{p(k)} \{ p(i \in k) : p(k) \} , \quad (4.6)$$

gdzie:

$p(k)$ - dyskretny rozkład częstości występowania pojazdów w klasach.

Reguła RW3, generująca rozkład $p_k(V)$ prędkości V_i źródeł elementarnych należących do k-tej klasy [137]:

$$RW3: p_k(V) \bigvee_{i \in N(\bar{V}, \delta_V)} \bigwedge_{k \in K} \bigwedge_{i \in S} \{ V_i : p_k(V) \} , \quad (4.7)$$

gdzie:

$N(\bar{V}, \delta_V)$ - rozkład normalny o wartości średniej $\bar{V}$ i odchyleniu standardowym δ_V .

4.4. Model hałasu źródła elementarnego

4.4.1. Reguła generalna modelu źródła elementarnego

Na podstawie def.3.5 oraz przyjętych w rozdz.4.2 założeń, modelem hałasu źródła elementarnego są reguły wiążące poziom mocy akustycznej L_{WA} pojazdu z jego klasą k i prędkością ruchu V, wraz z eksperymentalnie ustalonymi parametrami reguł. Opierając się na wynikach eksperymentalnych badań własnych [136][137] oraz przeprowadzonej procedurze weryfikacji modelu, omówionych szerzej w rozdz.4.5.2 i 4.5.3, sformułowano następujące reguły identyfikacji mocy akustycznej pojazdu samochodowego (są one optymalnym, ze względu na błąd modelowania wariantem modelu źródła elementarnego [137]):

1. Każdy pojazd poruszający się po drodze w swobodnym strumieniu ruchu, ze względu na moc akustyczną W_A oraz prędkość ruchu V można zakwa-

lifikować do jednej z trzech klas, oznaczonych dalej: lekka, średnia i ciężka.

2. Poziom mocy akustycznej $L_{Wai,k}$ i-tego pojazdu należącego do klasy k , poruszającego się z prędkością V_i jest zmienną losową należącą do rozkładu normalnego $N(\bar{L}_{Wak}, \sigma_k)$, przy czym $\bar{L}_{Wak}$ oznacza wartość średnią rozkładu, a σ_k odchylenie standardowe.

Analityczna postać modelu hałasu źródła elementarnego, które reprezentuje pojazd samochodowy, jest następująca:

$$MS_e: \bigwedge_{i \in S} \bigwedge_{k \in K} \left\{ L_{Wai,k} : [N(\bar{L}_{Wak}, \sigma_k) \bigwedge \begin{cases} V_i \geq 35 & \{\bar{L}_{Wak} = a_k \lg V_i + b_k\} \\ V_i < 35 & \{\bar{L}_{Wak} = a_k \lg V_i + b_k\} \end{cases} \right\}, \quad (4.8)$$

gdzie; a_k i b_k oraz σ_k są empirycznymi współczynnikami modelu hałasu źródła zależnymi od klasy k pojazdu.

Wyznaczone dla typowych warunków polskich wartości współczynników a_k i b_k oraz σ_k wynoszą⁴⁰ [137]:

klasa lekka	$a_k = \begin{cases} 21,0 \\ 13,6 \\ 11,0 \end{cases}$	$b_k = \begin{cases} 62 \\ 76 \\ 87 \end{cases}$	$\sigma_k = \begin{cases} 2,1 \\ 2,8 \\ 3,8 \end{cases}$	[dB] .
klasa średnia				
klasa ciężka				

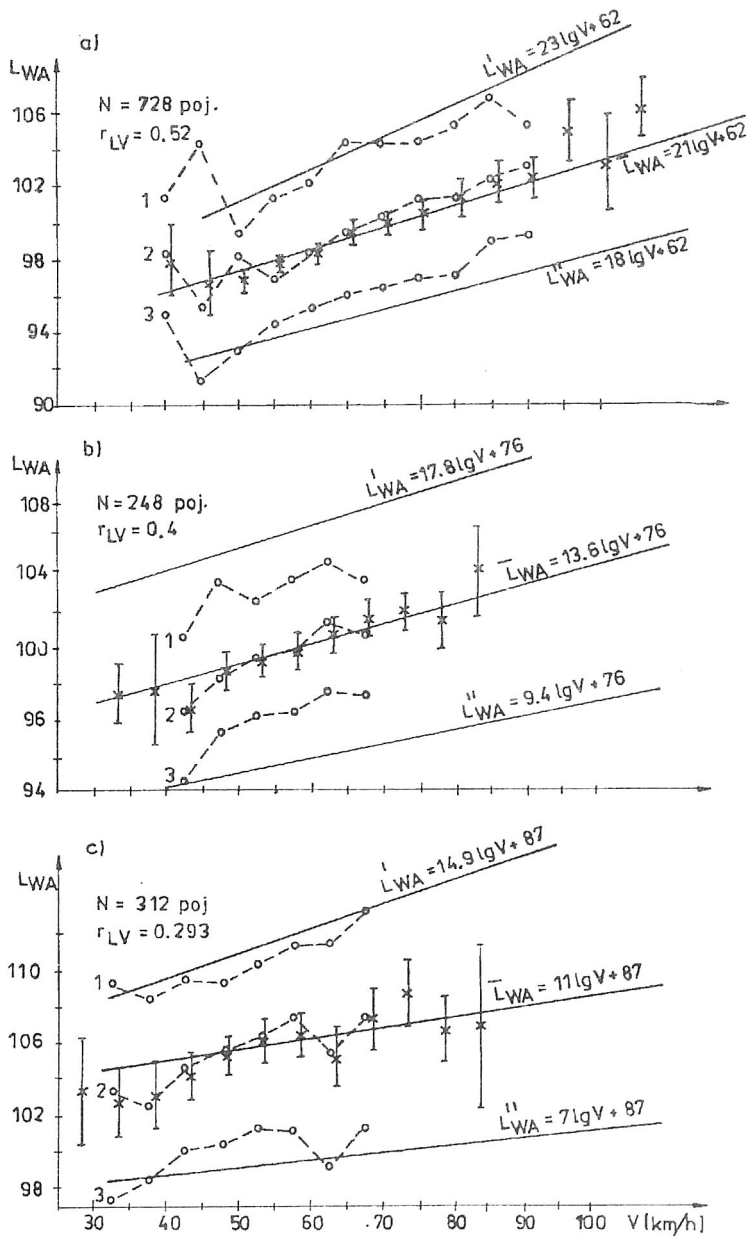
Wyniki eksperymentalnej weryfikacji wariantów modelu źródła elementarnego, podane w tabeli 4.2, wskazują na celowość podziału parku pojazdów na trzy klasy, gdyż zastosowanie podziału dwuklasowego (na ogół stosowanego) prowadzi do pogorszenia wyników prognozy [137]. Jednak brak

Rys. 4.4. Parametry pozycyjne L_{WAX} (o---o) oraz poziom średni $\langle L_{WA} \rangle$ (x) rozkładu $p_{kr}(L_{WA})$, wyznaczone w przedziałach $\Delta V = 5$ km/h [136] [137]: 1 - L_{WA10} , 2 - L_{WA50} , 3 - L_{WA90} , $\bar{x}$ - szerokość przedziału ufności dla $\alpha=0,05$; $\bar{L}_{WA}$, L_{WA} , L_{WA}'' - proste regresji odpowiednio o współczynnikach $\{a_k, b_k\}$ wg (4.8) oraz $\{a_k + \Delta a_k, b_k\}$ i $\{a_k - \Delta a_k, b_k\}$; a) klasa lekka, b) średnia, c) ciężka

Fig. 4.4. Position parameters L_{WAX} (o---o) and the average level $\langle L_{WA} \rangle$ (x) of the distribution $p_{kr}(L_{WA})$, determined in velocity intervals $\Delta V = 5$ km/h [136][137]: 1 - L_{WA10} , 2 - L_{WA50} , 3 - L_{WA90} , $\bar{x}$ - width of the confidence interval for $\alpha=0,05$; $\bar{L}_{WA}$, L_{WA} , L_{WA}'' - regression lines of coefficients $\{a_k, b_k\}$ acc. (4.8) as well as $\{a_k + \Delta a_k, b_k\}$ and $\{a_k - \Delta a_k, b_k\}$, respectively; a) light, b) medium, c) heavy class

⁴⁰Badania przeprowadziła autorka w latach 1980-1981. Celowe byłoby uaktualnienie wyników badań, ze względu na zmianę marek samochodów dominujących na krajowych drogach.

dokładnych danych dotyczących przewidywanego składu pojazdów dla nowo projektowanych arterii, skłania do stosowania podziału dwuklasowego w praktycznych zastosowaniach modelu. Współczynniki empiryczne dla klasy



lekkiej⁴¹, wyznaczone przy założeniu dwuklasowego podziału parku pojazdów, wynoszą:

$$a_k = 18 \text{ dB}, \quad b_k = 68 \text{ dB}, \quad \sigma_k = 3 \text{ dB}.$$

Dla porównania w tabeli 4.1a przedstawiono wyniki podobnych badań prowadzonych w innych krajach [21][36][60][93]. W tabeli 4.1b przedstawiono empiryczne wartości poziomu ekspozycyjnego L_{AE} wywołanego przejazdem pojazdu samochodowego, podane dla warunków krajowych w pracach [67][111] oraz wyznaczone na podstawie wzoru (4.8). Uwzględniono przy tym fakt, że dla pojazdów poruszających się ze stałą prędkością V wzdłuż linii prostej, między poziomem ekspozycyjnym L_{AE} i poziomem mocy akustycznej L_{WA} , zachodzi relacja [35][36]:

$$L_{AE} = L_{WA} - 10 \lg(dV) - \lg(2), \quad (4.9)$$

w której d jest prostopadłą odległością punktu obserwacji od linii ruchu. Można stwierdzić, że wartości współczynników (a_k i b_k) (tab.4.1a) wyznaczone w różnych krajach znacznie się różnią, co jest najprawdopodobniej wynikiem odmiennych warunków ruchu. Natomiast wartości poziomu L_{AE} (tab.4.1b) są zgodne dla klasy lekkiej oraz różnią się od 1,5 do 3 dB dla klasy ciężkiej.

W tabeli 4.2 podano wyniki weryfikacji eksperymentalnej modelu symulacyjnego z ustalonym, optymalnym wariantem modelu hałasu źródła elementarnego, jak w (4.8), przy trójklasowym (a) i dwuklasowym (b) podziale pojazdów. W tabeli podano wartości średnie $\langle \Delta L_{def} \rangle$ i odchylenie standardowe $\hat{S}$ rozkładu różnic między wartościami parametrów oceny klimatu akustycznego, które uzyskano z pomiaru oraz w procesie symulacji dla takich samych parametrów ruchu, dla 30 różnych sytuacji drogowych [137]. Analiza wyników wskazuje, że przy trójklasowym podziale pojazdów prezentowany model symulacyjny spełnia kryterium weryfikacyjne (3.2), dla $\epsilon = 1 \text{ dB}$, dla ustalonego zbioru wskaźników oceny hałasu, z wyjątkiem poziomu quasi-minimalnego L_{A90} , dla którego $\langle \Delta L \rangle = 1,9 \text{ dB}$. Zastosowanie podziału pojazdów na dwie klasy prowadzi do pogorszenia wyników, szczególnie dla poziomów L_{A90} (wzrost odchylenia standardowego rozkładu $\hat{S}$ do 9 dB) i L_{A10} (wzrost średniej wartości $\langle \Delta L \rangle$ do 1,3 dB).

W modelach hałasu ruchu drogowego jest przyjmowana na ogół deterministyczna, liniowa zależność między mocą akustyczną pojazdu a jego prędkością ruchu i klasą [21][27][35][36][102][106]. W celu oceny słuszności powyższego założenia, oszacowano także błąd modelowania podstawia-

⁴¹W tym przypadku klasa lekka obejmuje pojazdy zaklasyfikowane uprzednio do klasy lekkiej i średniej.

Tabela 4.1a

Porównanie empirycznych wartości współczynników a_k i b_k wg różnych autorów⁴², dla dwuklasowego podziału pojazdów

Autor	Klasa lekka		Klasa ciężka	
	a_k	b_k	a_k	b_k
Diggory, Oakes [27]	29,9	40,1	29,9	48,3
Lewis [36]	a) 32,8	31,6	26,9	49,1
	b) 28	31,6	14,5	49,1
Jacobs [60]	30	36,7	30	46,7
Rudno-Rudzińska [137]	18	68	11	87

- a) dla różnych sytuacji drogowych, gdy zmiana prędkości
V wynika ze zmiany warunków ruchu,
b) dla pojedynczych sytuacji drogowych.

Tabela 4.1b

Porównanie wartości ekspozycyjnego poziomu L_{AE} dla pojazdów samochodowych: A) wg [67], B) wg zależności (4.8) i (4.9) dla $\sigma_k = 0$; $L_{AE} = L_{AE0} - 10 \lg(d/d_0)$

L_{AE0} [dB]		
V [km/h]	40 < V < 80	80 ≤ V < 120
Klasa lekka: A	84	88
	B 83,5-85	85,7-88
V [km/h]	50 < V < 70	70 < V < 90
Klasa ciężka: A	93	95
	B 91,2-91,4	91,4-91,6

jąc $\sigma_k = 0$ w regule (4.8). Wyniki weryfikacji (tab.4.2, model c) potwierdziły przypuszczenie, że model symulacyjny oparty na deterministycznym modelu źródła elementarnego będzie szacował w sposób zadawalający tylko wartość średnią $\langle L_A \rangle$ oraz medianę L_{A50} rozkładu poziomu. Błąd oszacowania poziomu quasi-maksymalnego L_{A10} oraz ekwiwalentnego L_{AeqT} jest większy niż dla wariantu probabilistycznego i wynosi $|\Delta L_{def}| > 2,5$ dB (por. (a) i (c) w tabeli 4.2).

⁴²W pracach [60][93] i [94] wartości paramerów a_k i b_k podano dla maksymalnego poziomu dźwięku występującego w odległości d od linii ruchu. Do celów porównawczych wartości te zostały ujednolicone, wg wzoru (4.10), dla $d_0 = 1$ m.

Tabela 4.2

Wyniki weryfikacji eksperymentalnej wariantów modelu źródła elementarnego, wg badań własnych [137]

Para- metr	Model	L_{Aeq}	$\langle L_A \rangle$	L_{A10}	L_{A50}	L_{A90}
$\langle \Delta L_{def} \rangle$	a	0,19	0,37	-0,39	0,123	1,9
	b	-0,78	-0,07	-1,3	-0,27	-0,9
	c	-2,7	-0,4	-2,5	-0,57	2,25
$\hat{S}$	a	1,36	1,77	1,45	1,66	3,6
	b	1,6	1,8	1,9	2,0	9,4
	c	2,95	1,82	2,9	1,94	3,9

- a) podział trójklasowy,
 b) podział dwuklasowy,
 c) wariant deterministyczny ($\sigma_k = 0$)

4.4.2. Metodyka badań eksperymentalnych. Wyniki

Metodyka eksperymentalnej estymacji mocy akustycznej pojazdów wynika z przyjętego założenia, że pojazd samochodowy reprezentowany jest przez wszechkierunkowe źródło punktowe poruszające się ze stałą prędkością V po odbijającej powierzchni w ośrodku bezstratnym. Dla powyższych założeń, pominowszy dodatkowo efekt Dopplera⁴³, efekt unoszenia [112] oraz efekt interferencji między falą bezpośrednią i odbitą od powierzchni gruntu (patrz rozdz.6), zachodzi prosta zależność między poziomem mocy akustycznej L_{WA} ruchomego, punktowego źródła dźwięku o stałej mocy W_A i maksymalnym poziomem dźwięku L_{AM} , który występuje w punkcie obserwacji O , w momencie mijania go przez pojazd. Dla sytuacji, jak na rys.4.1, wzór (3.3) daje zależność:

$$L_{WA} = L_{AM} + 10 \lg (2\pi d^2) , \quad (4.10)$$

w której d oznacza odległość punktu od linii ruchu źródła.

Metodyka badań eksperymentalnych

Metodyka badań eksperymentalnych obejmuje dwa zasadnicze etapy: pomiary terenowe oraz analizę statystyczną wyników [137].

Etap I. Pomiary maksymalnego poziomu dźwięku L_{AM} pojazdów poruszających się w rzeczywistym strumieniu ruchu, z równoczesną identyfikacją pojazdu obejmującą: określenie klasy k pojazdu, jego prędkości V_i oraz odległości

⁴³Efekt Dopplera dla wszechkierunkowego źródła punktowego powoduje asymetrię w obrazie obserwowanego przebiegu czasowego zmian poziomu hałasu w punkcie obserwacji. Z badań przedstawionych w [35] i [112] wynika, że dla rozważanych prędkości ruchu $V \in \{40-100\}$ km/h, efekt Dopplera jest pomijalny. Błąd oszacowania mocy akustycznej L_{WA} wynikający z przesunięcia L_{AM} jest mniejszy od 1 dB.

d linii ruchu od punktu obserwacji. Wynikiem końcowym badań jest zbiór parametrów charakteryzujących pojazd jako źródło hałasu S_i :

$$S_i : \{L_{WAi}, V_i, k\} . \quad (4.11)$$

Etap 2 - Analiza. Etap ten obejmuje wyznaczenie statystycznie wiarygodnych reguł modelu hałasu źródła elementarnego na podstawie zbioru parametrów (4.11) wyznaczonych w etapie I.

Testowano dwa warianty reguły - wariant quasi-deterministyczny (wzór (4.12a)) oraz wariant probabilistyczny (wzór (4.12b)):

$$W1: \bigwedge_{i \in S} \bigwedge_{k \in K} \bigvee_{f: S \rightarrow K} \left\{ L_{WA}: [L_{WA, ik} = a_k \lg V_i + b_k] \right\} , \quad (4.12a)$$

$$W2: \left(\bigvee_{p(L_{WA}) \in N(\mu_{L_W}, \sigma_{L_W})} \bigwedge_{i \in S} \bigwedge_{k \in K} \bigvee_{f: S \rightarrow K} \bigwedge_{r \in R} \right) \Rightarrow \quad (4.12b)$$

$$\Rightarrow \{L_{WA}: [L_{WA, ik, r}: p_{k, r}(L_{WA})]\} ,$$

gdzie:

a_k, b_k - współczynniki empiryczne, zależne od klasy pojazdów,

S - zbiór pojazdów samochodowych,

K - zbiór klas pojazdów,

R - zbiór przedziałów prędkości o szerokości ΔV ,

$p(L_{WA})$ - rozkład poziomów mocy akustycznej pojazdów,

i, k, r - indeksy w zbiorze, odpowiednio S, K, R .

W celu ustalenia ostatecznej postaci i parametrów zależności (4.12) przeprowadzono następujące eksperymenty [137]:

E1 - weryfikacja hipotezy o istnieniu zależności $L_{WAK} = a_k \lg V_i + b_k$ dla pełnego zakresu prędkości ruchu V ,

E2 - weryfikacja hipotezy o normalności rozkładu $p_{kr}[L_{WA}(V_i \in \Delta V_r)]$ poziomu mocy akustycznej L_{WA} pojazdów należących do k -tej klasy i poruszających się z prędkością $V_i \in \Delta V_r$ oraz wyznaczenie parametrów tych rozkładów dla założonych klas pojazdów ($k \in \{1, 2, 3\}$) w przedziałach prędkości $\Delta V = 5 \text{ km/h}$,

E3 - wyznaczenie współczynników a_k i b_k w zależności (4.12a) oraz przedziałów ufności $2\Delta a_k$ i $2\Delta b_k$ dla $\alpha = 0,05$, dla ustalonych klas pojazdów ($k \in \{1, 2, 3\}$).

W eksperymentach stosowano następujące metody analizy statystycznej:

1. Do weryfikacji hipotezy o istnieniu związku (4.12a) badano współczynnik korelacji r_{LV} między maksymalnym poziomem dźwięku L_{AM} hałasu pojazdu i jego prędkością ruchu V , wraz ze statystycznym oszacowaniem jego wiarygodności.

2. Do wyznaczenia współczynników a_k i b_k w zależności (4.12a) stosowano metodę regresji liniowej (metodę najmniejszych kwadratów).
3. Do testowania hipotez o normalności badanych zmiennych losowych stosowano test zgodności χ^2 .

Wyniki badań

Podstawą do analizy statystycznej stanowiły wyniki pomiarów uzyskane dla 1200 pojazdów samochodowych poruszających się w rzeczywistych warunkach ruchu w typowych sytuacjach drogowych [136][137]. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla sześciu sytuacji drogowych, które spełniały w przybliżeniu przyjęte w modelu założenia dotyczące warunków ruchu oraz warunków propagacji dźwięku w otoczeniu. Można je sklasyfikować jako: arterie przelotowe w obrębie miasta [$V_d = (50-60)$ km/h], arterie wylotowe w obrębie miasta [$V_d = 70$ km/h], szosy [$V_d = 90$ km/h]; gdzie V_d jest dopuszczalną prędkością ruchu.

Wyniki badań eksperymentalnych, których szczegółowe wyniki przedstawiono w [137], potwierdzają⁴⁴ hipotezę o istnieniu związku pomiędzy mocą akustyczną pojazdu L_{WA} a jego klasą i prędkością ruchu V . Wyznaczone dla poszczególnych sytuacji drogowych współczynniki korelacji r_{LV} wynoszą: $r_{LV}^1 = (0,4-0,6)$ dla klasy lekkiej, $r_{LV}^2 = (0,33-0,5)$ dla klasy średniej, $r_{LV}^3 = (0,26-0,34)$ dla klasy ciężkiej, natomiast dla sześciu różnych sytuacji drogowych są mniejsze i wynoszą: $r_{LV}^1 = 0,5$, $r_{LV}^2 = 0,4$, $r_{LV}^3 = 0,29$. Uzyskane wartości r_{LV} są stosunkowo małe, zwłaszcza dla pojazdów klasy ciężkiej, co wskazuje na odbiegające od założeń warunki ruchu na badanych odcinkach drogi. Podawane w literaturze zachodniej wartości r_{LV} są znacznie większe, np. $r_{LV} = 0,82$ [93][94].

Potwierdzona została także hipoteza o normalności rozkładu $p_{kr}(L_{WA})$ poziomu mocy pojazdów poruszających się z prędkościami z przedziału ($V_r \pm 2,5$ km/h)⁴⁵.

Syntetyczne wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono na rys.4.4, na którym dla poszczególnych klas pojazdów i przedziałów prędkości ΔV podano: poziomy średnie $\langle L_{WA} \rangle$ wraz z przedziałem ufności wyznaczonym na poziomie $\alpha = 0,05$, odchylenie standardowe rozkładu σ_{LW} , parametry pozycyjne rozkładu $p(L_{WA})$: L_{WA10} , L_{WA50} , L_{WA90} . Daje się zauważyć występującą zależność między narastającym trendem wartości średnich $\langle L_{WA,k,r} \rangle$ rozkładów

⁴⁴Testowano hipotezę $H_0: r_{LV} = 0$ wobec hipotezy alternatywnej $H_1: r_{LV} \neq 0$ na poziomie ufności $\alpha = 0,05$. Mimo małych wartości r_{LV} dla większości badanych sytuacji drogowych hipoteza H_0 została odrzucona [137].

⁴⁵Zakres prędkości podzielony został na przedziały $\Delta V = 5$ km/h, tak aby liczebność próby pojazdów spełniała kryterium statystycznej wiarygodności $N \geq 30$ [137].

$P_{kr}(L_{WA})$ a przebiegiem prostej regresji $L_{WA} = a_k \lg V + b_k$ o współczynnikach a_k i b_k , oraz narastającym trendem wartości quasi-maksymalnych L_{WA10} i quasi-minimalnym L_{WA90} a przebiegiem prostych regresji odpowiednio o współczynnikach $(a_k + \Delta a_k, b_k)$ i $(a_k - \Delta a_k, b_k)$, które odpowiadają krańcowym wartościom wyznaczonego przedziału ufności współczynnika a_k .

4.5. Eksperymentalna weryfikacja modelu

4.5.1. Kryteria weryfikacji

Hałas ruchu drogowego jest procesem losowym, z czego wynika, że dla określonych warunków ruchu wartości parametrów wyznaczone zarówno na podstawie pomiaru, jak i w procesie symulacji są estymatorami rzeczywistych wartości i są obarczone pewnym błędem losowym (patrz rozdz.2.5). Przy losowym charakterze opisywanych zjawisk, porównanie wyników procesu symulacji i pomiaru można przeprowadzać tylko w sensie statystycznym, porównując parametry rozkładów estymatorów odpowiednich wielkości uzyskanych w procesie wielokrotnej symulacji i pomiaru dla tych samych sytuacji drogowych i takich samych warunków ruchu. W praktyce nie jest możliwe, pomijając względy czasochłonności eksperymentów, wielokrotne powtarzanie pomiarów w rzeczywistych sytuacjach drogowych przy utrzymaniu założenia o niezmienności parametrów ruchu. Z tego względu analizę błędu modelu oparto na porównaniu wyników pomiaru i symulacji dla wielu sytuacji w ruchu.

Kryterium eksperymentalnej weryfikacji modelu zdefiniowano następująco [137]:

$$\langle \delta_m \rangle \approx \langle \Delta(\bar{L}_{def} - \tilde{L}_{def}) \rangle \leq 1 \text{ dBA}, \quad (4.13a)$$

$$\sigma_m \approx \sqrt{\bar{\sigma}_{def} + \tilde{\sigma}_{def}}, \quad (4.13b)$$

gdzie:

- $\langle \delta_m \rangle$ - wartość średnia błędu modelu,
- σ_m - odchylenie standardowe rozkładu błędu modelu,
- $\bar{\sigma}_{def}$ i $\tilde{\sigma}_{def}$ - odchylenia standardowe rozkładu błędu estymacji parametru L_{def} odpowiednio dla pomiaru ($\bar{}$) i symulacji ($\tilde{}$),

4.5.2. Błąd estymacji parametrów oceny klimatu akustycznego

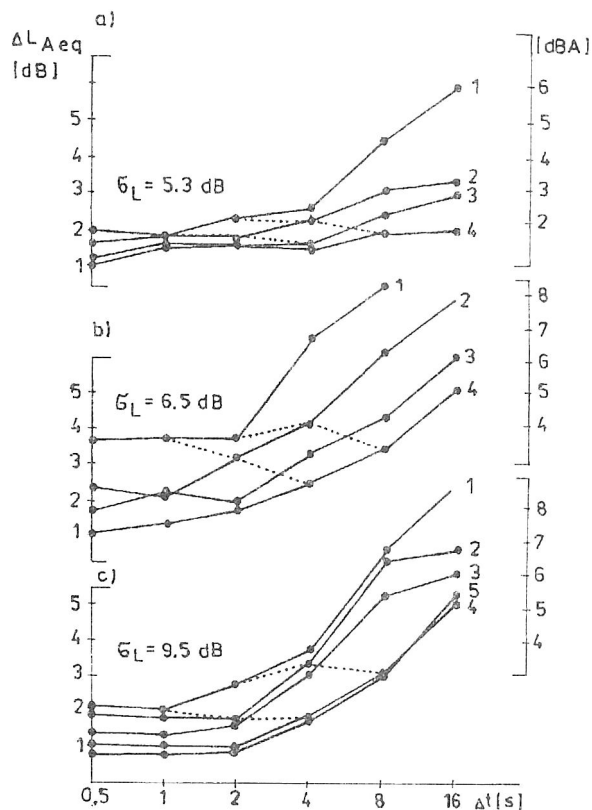
Parametry oceny klimatu akustycznego $\{L_{def}\}$ zarówno w procesie symulacji, jak i pomiaru wyznaczane są poprzez próbkowanie przebiegu czasowego poziomu dźwięku $L_A(t)$ w dyskretnych momentach czasu t_n w odstępach Δt

dla wybranego odcinka czasu T_s , który jest reprezentatywny dla dłuższego przedziału czasu T [39][133][137]. Postępowanie takie opiera się na założeniu, że hałas wytwarzany przez strumień pojazdów jest ergodycznym, stacjonarnym procesem losowym, a średnie chwilowe wartości parametrów ruchu nie zmieniają się zasadniczo w okresie T . Jak wykazano w pracy [137] błąd estymacji L_{def} wynikający z przyjętych wartości Δt i T_s zależy od parametrów ruchu i związanego z nim odchylenia standardowego σ_L rozkładu poziomów hałasu $p(L)$ w punkcie obserwacji O . Z punktu widzenia efektywności modelu (czas obliczeń) oraz metody pomiarowej (czas pomiaru), kryterium optymalnego doboru Δt i T_s jest wybór maksymalnej wartości Δt i minimalnej wartości T_s , dla których błąd oszacowania nie różni się w istotny sposób od błędu minimalnego, co można zapisać:

$$K_{opt.} : \begin{cases} \Delta t \rightarrow \max \\ T_s \rightarrow \min \\ \Delta L_{def} \approx \Delta L_{def}(\min) \end{cases} \quad (4.14)$$

Parametry Δt_o i T_{so} odpowiadające $\Delta L_{def}(\min)$ przyjmuje się za optymalne, a błąd estymacji parametrów oceny dla Δt_o i T_{so} jest optymalnym (minimalnym) błędem estymacji. Z eksperymentalnej oraz teoretycznej analizy błędów estymacji przeprowadzonej przez autorkę w [137] wynika, że dla rozpatrywanego zakresu natężeń ruchu $Q \in \{500-1500\}$ poj/h, optymalny czas próbkowania sygnału pomiarowego wynosi $\Delta t_o = 1$ s, a optymalny czas obserwacji $T_{so} = 900$ s⁴⁶ przy założeniu, że $T = 1$ h (rys.4.5). Analiza wyników wskazuje, że bezwzględne wartości błędu estymacji w procesie symulacji są wyraźnie mniejsze niż przy pomiarach rzeczywistych hałasów i zbliżone do uzyskanych z teoretycznego oszacowania błędu dla niezależnego próbkowania [39][137]. Do analizy błędu modelu przyjmuje się wartości odgórnego oszacowania błędu estymacji, ustalone dla optymalnych parametrów próbkowania Δt_o i T_{so} dla trzech zakresów natężeń ruchu, podane w tabeli 4.3.

⁴⁶Dla $\Delta t > 1$ s występuje wyraźny wzrost błędu estymacji pomiarowej, natomiast dla $\Delta t < 1$ s następuje jego stabilizacja. Błąd oszacowania jest funkcją monotonicznie malejącą ze wzrostem czasu T_s , nie występuje tutaj obszar stabilizacji błędu, lecz prawidłowością jest malenie nachylenia krzywej błędu dla wartości $T_s \geq 900$ s. Stwierdza się przy tym, że bezwzględna wartość błędu oszacowania $\langle L_A \rangle$ oraz L_{A50} zależy od odchylenia standardowego rozkładu $p(L)$, a więc także natężenia ruchu Q . Nie stwierdza się natomiast istotnego związku między błędem estymacji L_{A10} i L_{AeqT} a natężeniem Q , co jest niezgodne z oczekiwaniem i teoretycznymi rozważaniami [137].



Rys. 4.5. Błąd pomiaru ekwiwalentnego poziomu dźwięku L_{AeqT} w funkcji okresu próbkowania Δt dla różnych czasów obserwacji T_s hałasu drogowego [133][137]: 1 - 5 min, 2 - 10 min, 3 - 15 min, 4 - 20 min; a) $Q=1500$ poj/h, b) $Q=660$ poj/h, c) $Q=350$ poj/h. Linia kropkowaną połączono punkty wyznaczone przy jednakowej liczbie próbek $N=T_s/\Delta t$

Fig. 4.5. Measuring error of the continuous A-weighted equivalent sound pressure level, L_{AeqT} , as a function of sampling period Δt for different observation time T_s of traffic noise: 1 - 5 min, 2 - 10 min, 3 - 15 min, 4 - 20 min; a) $Q=1500$ vehicle/h, b) $Q=660$ vehicle/h, c) $Q=350$ vehicle/h [133][137]. Points obtained at the same number of samples $N=T_s/\Delta t$ are joined by a dotted line

Tabela 4.3

Wartości odgórnego oszacowania błędów estymacji parametrów hałasu drogowego dla pomiaru i symulacji [137]

	Q [poj/h]	σ_L	ΔL_{AeqT}	$\langle \Delta L \rangle$ [dB]	ΔL_{A10}	ΔL_{A50}	ΔL_{A90}
Symulacja	>1000	5-6	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0
	500-1000	6-8	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5
	< 500	>8	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5
Pomiar	>1000	5-6	2,5	2,0	2,5	1,5	3,0
	500-1000	6-8	2,5	3,0	2,5	3,5	3,0
	< 500	>8	2,5	5,0	2,5	7,0	3,0

σ_L - odchylenie standardowe rozkładu chwilowych wartości poziomów dźwięku p(L).

4.5.3. Błąd modelu

Założmy, że błąd δ_m modelu jest zmienną losową o rozkładzie normalnym $N(\mu_m, \sigma_m)$ oraz że błędy estymacji dla pomiaru i symulacji są niezależnymi zmiennymi losowymi o znanych wariancjach σ_{Ldef}^2 i $\tilde{\sigma}_{Ldef}^2$, odpowiednio. Wtedy, jak wykazano w [137], wartości parametrów, μ_m i σ_m , można wyznaczyć na podstawie parametrów rozkładu różnic między wartościami zmierzonymi, $\bar{L}_{def}$, i uzyskanymi w procesie symulacji, $\tilde{L}_{def}$, korzystając z następujących zależności:

$$\mu_m \cong \langle \delta_m \rangle = \langle \bar{L}_{def} \rangle - \langle \tilde{L}_{def} \rangle, \quad (4.15a)$$

$$\sigma_m \cong S_m = \sqrt{S_{\Delta}^2 - (S_{-}^2 + S_{+}^2)}, \quad (4.15b)$$

gdzie:

$(\bar{})$ - parametr uzyskany z pomiaru,

$(\tilde{})$ - parametr uzyskany w procesie symulacji,

$\langle L_{def} \rangle$ - wartość średnia w rozważanym zbiorze N elementowym:

$$\langle L_{def} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_{def,i}, \quad (4.16)$$

gdzie:

$L_{def,i}$ - wartość i-tej próby,

S_{Δ}^2 - estymator wariancji rozkładu różnic między wartościami zmierzonymi i obliczonymi, wg zależności:

$$S_{\Delta}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{L}_{def,i} - \tilde{L}_{def,i})^2, \quad (4.17)$$

S_-^2 i S_+^2 - estymatory odpowiednio wariancji σ_-^2 i σ_+^2 związane z podanymi w tab.4.2 błędami estymacji $\Delta\bar{L}_{def}$ i $\Delta\tilde{L}_{def}$ następującymi zależnościami:

$$S_- = \Delta\bar{L}_{def} / 2t_\alpha, \quad S_+ = \Delta\tilde{L}_{def} / 2t_\alpha \quad (4.18)$$

gdzie t_α - wartość z rozkładu t-Studenta dla $\alpha = 0,1$ i liczności próby N.

4.5.4. Wyniki weryfikacji eksperymentalnej modelu

Eksperymenty weryfikacyjne przeprowadzono dla 30 różnorodnych odcinków drogowych spełniających w przybliżeniu przyjęte w pracy założenia dotyczące warunków ruchu i otoczenia. Badania obejmowały drogi o różnym charakterze (arterie miejskie przelotowe i wylotowe, szosy), o liczbie pasów ruchu $m \in \{2,6\}$ i natężeniu ruchu $Q \in \{350,2300\}$ poj/h, przy czym w 10 przypadkach $Q > 1000$ poj/h, dla 15 sytuacji $Q \in \{500,1000\}$ poj/h, a dla 5 sytuacji $Q < 500$ poj/h. Sposób pomiaru i analizy był zgodny z ustaleniami dokonanymi w rozdz.4.5.2 (tzn. czas pomiaru $T_g = 900$ s, odstęp próbkowania $\Delta t = 1$ s). Dla każdego odcinka drogi mierzono równocześnie parametry ruchu, które następnie wprowadzano jako dane do modelu.

Wygenerowane przez model symulacyjny parametry oceny hałasu ze zbioru $\{\tilde{L}_{def}\}$ porównywano w sensie kryterium (4.13) ze zbiorem parametrów zmierzonych $\{\bar{L}_{def}\}$. Wyznaczone parametry rozkładu błędu modelu dla przyjętego zbioru parametrów oceny klimatu akustycznego podano w tabeli 4.4. Uzyskane wyniki wskazują, że skonstruowany model symulacyjny emisji hałasu z arterii komunikacyjnej spełnia dla parametrów, L_{AeqT} , $\langle L_A \rangle$, L_{A10} i L_{A50} , przyjęte kryterium weryfikacyjne. Występują natomiast rozbieżności dla quasi-minimalnego poziomu L_{A90} . Są one wynikiem przyjęcia w obliczeniach arbitralnej, stałej wartości poziomu tła akustycznego w punkcie obserwacji. Dla małych wartości ($Q < 500$ poj/h) poziom ten ma decydujący wpływ na prognozowaną wartość L_{A90} (patrz także rozdz.7.5.1).

Tabela 4.4

Parametry rozkładu błędu modelu symulacyjnego [137]

Parametr	L_{AeqT}	$\langle L_A \rangle$	L_{A10}	L_{A50}	L_{A90}
$\langle \delta_m \rangle$ [dB]	0,19	0,373	-0,39	0,123	1,91
S_m [dB]	1,0	1,44	1,16	1,09	3,3
$\sqrt{S_-^2 + S_+^2}$	0,91	1,1	0,865	1,24	1,2

Przedstawiony w niniejszym rozdziale model symulacyjny prognozujący parametry oceny hałasu dla swobodnego strumienia ruchu pojazdów nie stanowi kompleksowego rozwiązania pełnej klasy sytuacji występujących w układach komunikacyjnych, gdyż przyjęte założenia wyjściowe odpowiadają tylko warunkom ruchu na międzywęzłowych odcinkach arterii komunikacyjnych.

Przy formułowaniu modelu zbadano kilka wariantów modelu hałasu źródła elementarnego (MS_e), który wiąże poziom mocy akustycznej pojazdu z jego prędkością oraz klasą. Ustalono jego ostateczną postać analityczną oraz wyznaczono występujące w nim parametry dla typowych warunków krajowych. Wyznaczono także typy i parametry rozkładów wielkości występujących w modelu struktury MO_s . Dzięki temu, zaprezentowany model, mimo swojego ograniczonego charakteru, może stanowić narzędzie do praktycznych zastosowań.

Ogólna koncepcja modelu, dzięki zastosowaniu generatywnego podejścia do konstruowania tego typu modelu oraz wprowadzeniu ścisłego podziału reguł, pozwala na modularną jego modyfikację, tzn. na modyfikację konkretnego zestawu reguł przy zadanym zespole czynników koniecznych do uwzględnienia. Możliwe jest uwzględnienie wpływu charakteru otoczenia arterii poprzez modyfikację funkcji propagacji F_p w zależności (4.1) (por.3.6), a także symulację ruchu po dowolnej krzywej opisanej analitycznie. Analizę możliwości rozszerzenia modelu o wpływ infrastruktury urbanistycznej omówiono szerzej w rozdz.7.

5. MODEL ZASTĘPCZY HAŁASU ARTERII KOMUNIKACYJNEJ

5.1. Wprowadzenie

Przedstawiony w niniejszym rozdziale model hałasu arterii komunikacyjnej skonstruowany został zgodnie z ogólną koncepcją modelowania ZHŚ podaną w roz.3.5. Na podstawie def.3.8 i 3.9 odcinek drogi zastępuje się równoważnym zbiorem stacjonarnych, wszechkierunkowych źródeł punktowych, których moc akustyczna jest funkcją parametrów ruchu, a ich liczba oraz rozkład zależą od parametrów geometrycznych jezdni [142/II][144][149]. Transformacja ta stwarza podstawy do syntezy modelu źródła hałasu oraz geometrycznego modelu propagacji dźwięku w przestrzeni ograniczonej, która pozwala na sformułowanie metody prognozowania hałasu ruchu drogowego w przestrzeni zurbanizowanej (patrz rozdz.7 i 8). W związku z tym wprowadzono częstotliwość f jako dodatkowy parametr modelu źródła elementarnego.

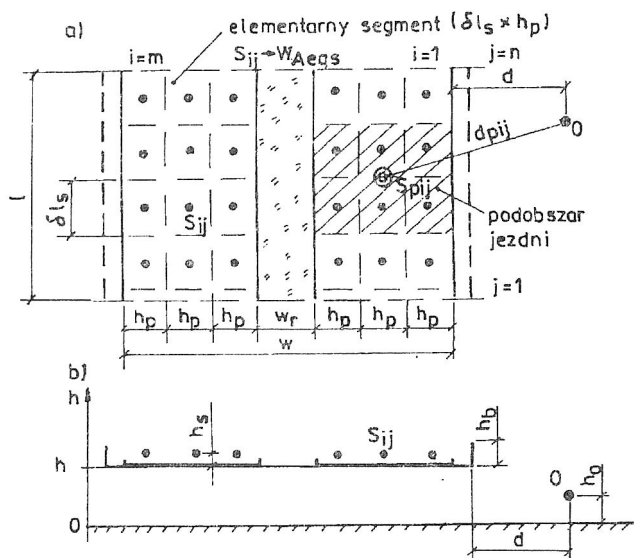
W stosowanych metodach prognozowania hałasu drogowego źródło charakteryzowane jest na ogół przez parametry pola akustycznego. W metodzie podanej w pracy [79] jest to np. ekwiwalentny poziom dźwięku L_{AeqT} , który występuje w standardowo ustalonym punkcie odniesienia (w odległości $d_0 = 1$ m od krawężnika jezdni) w warunkach przestrzeni otwartej. W metodach rozwijanych przez Makarewicza wielkością wyjściową jest ekwiwalentny poziom dźwięku $L_{AeqT,i}$ lub ekspozycyjny poziom dźwięku $L_{AE,i}$ hałasu wywołanego przejazdem pojedynczego pojazdu i -tej klasy [102][103][106][111].

W niniejszej pracy, przy formułowaniu reguł modelu hałasu źródła elementarnego (def.3.9) oraz ustalaniu jego parametrów akustycznych, badania rzeczywistych układów komunikacyjnych zastąpiono eksperymentami numerycznymi, w których wykorzystano symulacyjny model hałasu strumienia pojazdów przedstawiony w rozdz.4. Na tym etapie badań przeprowadzono tylko weryfikację reguł modelu hałasu źródła elementarnego, którą oparto na porównaniu wyników obliczeń modelowych z wynikami uzyskanymi w procesie symulacji dla takich samych sytuacji i warunków ruchu. Założono tu, że zweryfikowany empirycznie model symulacyjny może być traktowany jako wzorzec dla modelu zastępczego.

Wyniki eksperymentalnej weryfikacji modelu zastępczego hałasu arterii komunikacyjnej przedstawiono w rozdz.7, w którym rozwinięto zagadnienie prognozowania hałasu drogowego w przestrzeni zurbanizowanej.

5.2. Założenia

Na podstawie założeń ogólnych formułowania zastępczych modeli ZHŚ (rozdz.3.5) przyjmuje się:



Rys. 5.1. Schemat odcinka drogi przyjęty w stacjonarnym modelu hałasu;
a) rzut poziomy odcinka, b) przekrój poprzeczny

Fig. 5.1. Road segment scheme assumed for the stationary noise model;
a) plane, b) cross-section

1. Zastępczym modelem hałasu odcinka drogi o szerokości w i długości l jest zbiór stacjonarnych, wszechkierunkowych źródeł punktowych, reprezentujących jednorodny podobszary o szerokości δw i długości δl prostego odcinka drogi, gdzie:

def.5.1. Jednorodnym podobszarem jezdni jest fragment jezdni składający się z wielokrotności segmentów elementarnych, który spełnia kryterium punktowości (3.33) dla najbliższych punktów przeszerzenia obserwacji (rys.5.1);

def.5.2. Elementarnym segmentem drogi jest odcinek pasa ruchu o długości δl_s , dla którego ustala się reguły estymacji mocy akustycznej W_{Aeqs} .

2. Założenia dotyczące warunków ruchu na odcinku drogi oraz otoczenia są takie same jak w modelu symulacyjnym (rozdz.4.2).

3. Parametrami charakteryzującymi elementarne źródło dźwięku jest ekwiwalentny poziom skorygowanej mocy akustycznej L_{WAeq} oraz charakterystyka widmowa mocy $L_W(f_0)$ określona w pasmach oktaowych częstotliwości, która spełnia zależność

$$L_{WAeq} = 10 \lg \sum_{k=1}^8 10^{0,1(L_{Wk}(f_0) + A_k)}, \quad (5.1)$$

przy czym A_k - wartość poprawki w dB dla krzywej korekcyjnej A w k-tym pasmie.

4. Ekwiwalentny poziom mocy akustycznej L_{WAeq} źródła elementarnego jest funkcją podstawowych parametrów charakteryzujących warunki ruchu na danym pasie jezdni: natężenia ruchu Q , średniej prędkości ruchu $\bar{V}$ oraz procentowego udziału pojazdów klasy ciężkiej p_c :

$$L_{WAeq} = f(Q, \bar{V}, p_c). \quad (5.2)$$

Przyjmując założenie czwarte brano pod uwagę wyniki badań, które wskazują na dominujący wpływ tych parametrów ruchu na poziom hałasu drogowego [1][48][119][152][161], a także dostępność danych dotyczących przewidywanych parametrów ruchu, znanych w fazie projektowania układów komunikacyjnych.

5.3. Model struktury źródła

Dla zastępczych modeli ze stacjonarnymi źródłami elementarnymi, model struktury źródła MO_s określają reguły dyskretyzacji obszaru jezdni na jednorodne podobszary (patrz def.5.1 oraz rozdz.3.5.5). Z punktu widzenia efektywności modelu ZHS optymalny podział obszaru jezdni na podobszary zachodzi wtedy, gdy wydzielone podobszary spełniają kryterium punktowości (3.33) przy minimalnej liczbie elementarnych źródeł zastępczych n_e .

W przypadku arterii komunikacyjnej podział obszaru jezdni na pasy ruchu jest oczywisty. Jeżeli na rozpatrywanym pasie warunki ruchu w okresie T są stałe, to można przyjąć, że jest on powierzchniowym (liniowym) źródłem dźwięku o równomiernie rozłożonej ekwiwalentnej mocy akustycznej. Jeżeli każdy z pasów ruchu podzielony zostanie na n segmentów o długości δl_s , to, jak wykazano w rozdz.3.5.2, na każdy z segmentów przypada taka sama równoważna moc akustyczna W_{Aeq} , zależna od warunków ruchu na pasie oraz długości segmentu δl_s . Ustalenie (na etapie formułowania modelu) optymalnego podziału pasa jezdni na odcinki δl_s nie jest możliwe, gdyż kryterium (3.33) zawiera w sobie odległość punktu obserwacji. W związku z tym przyjmuje się następujące zasady dyskretyzacji obszaru jezdni:

- elementarnym segmentem drogi jest odcinek pasa ruchu o długości $\delta l_s = 10$ m,

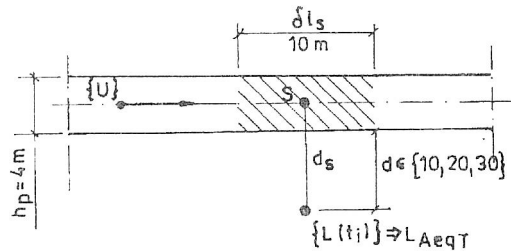
- kryteria podziału jezdni na jednorodne podobszary (def.5.1) ustala się indywidualnie w zależności od geometrii analizowanej przestrzeni propagacji dźwięku oraz warunków ruchu na poszczególnych pasach.

Zaletą zaproponowanego podejścia jest możliwość optymalnego doboru modelu źródła zastępczego w zależności od analizowanych warunków otoczenia.

5.4. Model hałasu źródła elementarnego

5.4.1. Metodyka estymacji mocy akustycznej elementarnego segmentu drogi

Rozważmy sytuację jak na rys. 5.2. Jeżeli natężenie ruchu na m-tym pasie jezdni wynosi Q_m , to w ciągu $T = 1$ h przez odcinek pasa δl_s przejedzie Q_m pojazdów samochodowych. Jeżeli przyjmiemy założenia dotyczące



Rys. 5.2. Schemat sytuacji pomiarowej w eksperymencie numerycznym;
 δl_s - elementarny odcinek pasa ruchu

Fig. 5.2. Outline of the numerical experiment; δl_s - elementary segment of a traffic lane

warunków ruchu jak w modelu symulacyjnym (rozdz.4.2), to na podstawie rozdz.3.5.2 i 3.5.5, dla punktów obserwacji w odległości $d \geq \delta l_s$, segment drogi δl_s jest źródłem ciągu losowych zdarzeń akustycznych, o następujących parametrach:

- czas trwania Δt_i i-tego zdarzenia odpowiada czasowi przejazdu i-tego pojazdu przez δl :

$$\Delta t_i = \delta l_s / V_i, \quad (5.3a)$$

przy czym z założenia (rozdz.4.2):

$$V_i \in N(\bar{V}, \sigma_v),$$

stąd:

$$\Delta t_i \in N(\bar{\Delta t}, \sigma_t),$$

- odstęp czasu $\delta t_{i,i+1}$ między kolejnymi zdarzeniami odpowiada interwałom czasowym τ_i między pojawieniem się kolejnych pojazdów (4.5):

$$\delta t_i = \tau_i \in P(1/Q_m), \quad (5.3b)$$

- moc akustyczna W_{Ai} i-tego zdarzenia, na podstawie rozdz.3.5.2 i 4.4, jest równa mocy akustycznej $W_{A,i}(V_i)$ i-tego pojazdu:

$$W_{Ai} = W_{A,ik}(V_i) \wedge 10 \lg(W_{A,ik}(V_i)/W_0) \in p(L_{WA}), \quad (5.3c)$$

gdzie: $10 \lg(W_{A,ik}(V_i)/W_0)$ - poziom mocy akustycznej wg (4.8).

Z losowego charakteru zmian parametrów ruchu oraz mocy akustycznej poszczególnych pojazdów, wynika losowy charakter ciągu zdarzeń akustycznych związanych z elementarnym segmentem drogi δl_s . Ponieważ $\Delta t_i = f(V_i)$ oraz $W_{A,ik} = f(V_i)$, więc nie ma podstaw do przyjęcia założenia o niezależności zmiennych losowych Δt i W_A (rozdz.3.5.4). Na podstawie rozdz. (3.5.2) i (3.5.3) ekwiwalentna moc akustyczna W_{Aeqs} źródła elementarnego (dla zdefiniowanego wyżej elementarnego segmentu δl_s) jest dana wzorem (3.31). Do wyznaczenia mocy akustycznej $W_{Az} = W_{Aeqs}$ konieczna jest znajomość rzeczywistych (empirycznych) rozkładów $p(\Delta t)$ i $p(W_A)$ lub rozkładu $p(W_{Aeqs})$.

Do wyznaczenia rozkładu $p(W_{Aeqs})$ wykorzystano skonstruowany wcześniej model symulacyjny hałasu strumienia pojazdów (rozdz.4). W eksperymencie numerycznym symulowano ruch pojazdów na odcinku drogi jedno-pasowej o szerokości $h_p = 4$ m dla zadanych warunków ruchu, jak w rozdz.4.2, przy optymalnych parametrach procesu symulacji $T_s = 15$ min i $\Delta t = 1$ s, które ustalono w rozdz.4.5.2. W punktach obserwacji O leżących w odległości $d = (10-30)$ m, jak na rys.5.2, rejestrowano chwilowe wartości poziomu dźwięku $L_A(t)$ hałasu pochodzącego tylko od pojazdów znajdujących się w danym momencie czasu t_n na wybranym segmencie pasa $\delta l_s = 10$ m (patrz reguła (4.1)). Uzyskano przy tym zbiór wartości chwilowych:

$$\{L_A(t_1), L_A(t_2), \dots, L_A(t_i), \dots, L_A(t_n)\}, \quad (5.4)$$

Dla sytuacji jak na rys.5.2., z uwzględnieniem def.3.9, poziom mocy akustycznej L_{WAeqs} źródła elementarnego wynosi:

$$L_{WAeqs}(\{R\}) = \bar{L}_{AeqT}(\{U\}) + 10 \lg(2\pi d_s^2), \quad (5.5)$$

gdzie:

$\bar{L}_{AeqT}(\{U\})$ - średnia wartość ekwiwalentnego poziomu dźwięku wyznaczona w procesie symulacji dlaadanego zbioru parametrów ruchu $\{U\}$,

d_s - odległość punktu obserwacji od zastępczego źródła punktowego segmentu drogi, $[d_s = d + h_p/2]$ (rys.5.2),

$\{U\}$ - zbiór parametrów charakteryzujących warunki ruchu na odcinku drogi, wg rozdz.4.2.:

$$\{U\} : \{Q_m, [(p_k, \bar{v}_k, \delta_{vk}); k \in (1, 2, 3)]\} ,$$

Q_m - natężenie ruchu [poj/h/pas],

p_k - procentowy udział pojazdów k-tej klasy,

$\bar{v}_k, \delta_{vk}$ - parametry rozkładu prędkości ruchu pojazdów k-tej klasy.

Ponieważ wyznaczona w procesie jednokrotnej symulacji wartość poziomu L_{AeqT} jest obarczona statystycznym błędem estymacji (patrz rozdz.4.5.2), do obliczenia poziomu mocy akustycznej segmentu drogi przyjmuje się wartość średnią poziomu $\bar{L}_{AeqT}$ wyznaczoną na podstawie rozkładu wyników uzyskanych w procesie symulacji dla N realizacji ($N = 30$), przy tych samych warunkach ruchu:

$$\bar{L}_{AeqT}\{U\} = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N L_{AeqT,r}\{U\} . \quad (5.6)$$

5.4.2. Eksperymenty symulacyjne. Wyniki

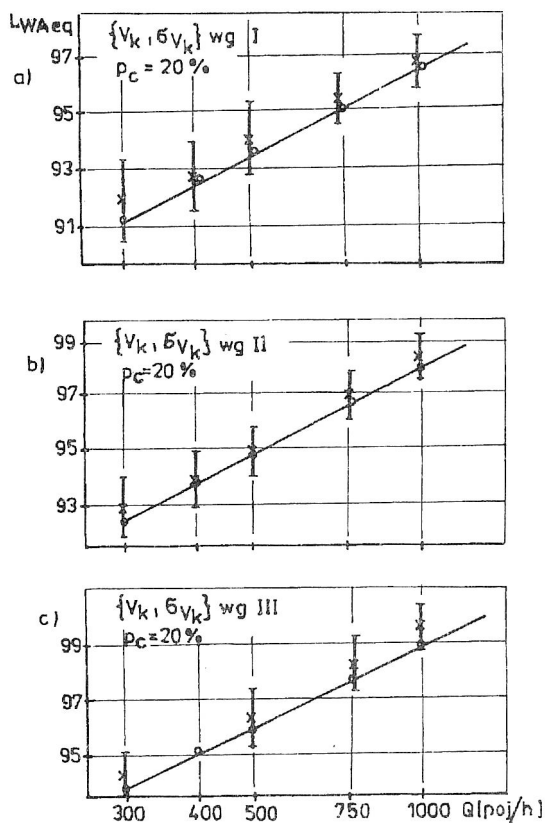
Zaplanowany cykl numerycznych badań symulacyjnych miał na celu ustalenie analitycznej postaci reguł modelu hałasu źródła zastępczego segmentu drogi. W eksperymentach tych, skorzystano z możliwości, jakie stwarza model symulacyjny. Badano zmiany L_{WAeq} w funkcji wybranego parametru ruchu, dla stałych wartości pozostałych parametrów [143/II]. Dobre zakresu zmian wartości parametrów ruchu (natężenia ruchu Q , średnie prędkości ruchu $\bar{v}$ oraz procentowe składy pojazdów poszczególnych klas) wynikał z typowych wartości tych parametrów dla krajowych warunków ruchu ustalonych w [137].

Eksperyment 1. Badano zmiany L_{WAeqs} w funkcji natężenia ruchu Q_m z przedziału 300+1500 poj/h, dla [137]:

- typowego składu pojazdów w potoku ruchu: $p_1 = 70\%$ (klasa lekka), $p_2 = 10\%$ (klasa średnia), $p_3 = 20\%$ (klasa ciężka);

- trzech charakterystycznych zbiorów parametrów rozkładu prędkości pojazdów $N(\bar{v}_k, \sigma_{vk})$, jak w tabeli 5.1, odpowiadających typowym warunkom dla arterii w obrębie miasta - (I i II) oraz dla szosy - (III).

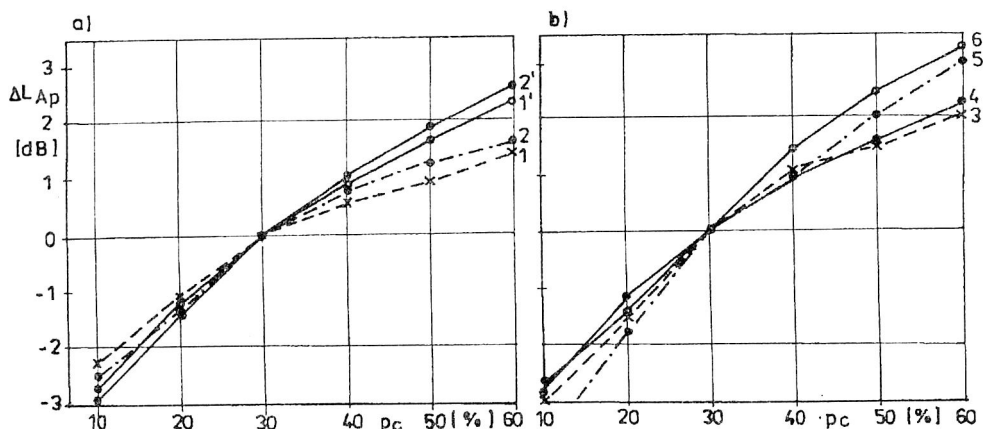
Eksperyment 2. Badano wpływ procentowego udziału pojazdów klasy ciężkiej $p_c = p_3$. Przyjęto $p_c \in (10-60)\%$ dla stałej wartości natężenia ruchu $Q_m = 1000$ poj/h.



Rys. 5.3. Poziom skorygowanej mocy akustycznej L_{WAeq} zastępczego źródła hałasu elementarnego segmentu drogi δl_s w funkcji natężenia ruchu Q ; $\overline{\text{I}}$ - model symulacyjny: $\times$ - wartość średnia, $\overline{\text{I}}$ - zakres zmian $L_{AeqT}\{U\}$, $\cdots$ - wg modelu zastępczego, $\{V_k, \sigma_k\}$ wg tab.5.1: a) - I, b) - II, c) - III

Fig. 5.3. A-weighted acoustic power level L_{WAeq} of the substitute noise source for elementary road segment δl_s as a function of traffic volume Q : $\overline{\text{I}}$ - simulation model: $\times$ - average value, $\overline{\text{I}}$ - range of changes $L_{AeqT}\{U\}$, $\cdots$ - acc. to substitute model, $\{V_k, \sigma_k\}$ acc. to Tab. 5.1: a) - I, b) - II, c) - III

Analiza uzyskanych wyników badań symulacyjnych, które przedstawiono w sposób syntetyczny na rys.5.3 i 5.4, dowodzi że:



Rys. 5.4. Zmiany poziomu dźwięku, $\Delta L_{Ap} = L_{AeqT}(p_c) - L_{Aeq}(30)$, w funkcji procentowego udziału pojazdów klasy ciężkiej, p_c [142/II]; a) model symulacyjny: 1 - $\{\bar{v}_k, \sigma_k\}$ wg II w tab.5.1, 2 - wg I w tab.5.1; model stacjonarny: 1' - $\bar{v}_O = 70$ km/h, $\bar{v}_C = 55$ km/h, 2' - $\bar{v}_O = 50$ km/h, $\bar{v}_C = 45$ km/h; b) 3 - wg [79], 4 - wg [106], 5 - wg FHWA [48] dla $\bar{v} = 50$ km/h, 6 - wg FHWA dla $\bar{v} = 70$ km/h

Fig. 5.4. Changes of sound level, $\Delta L_{Ap} = L_{AeqT}(p_c) - L_{Aeq}(30)$, as a function of percentage participation of heavy class vehicles, p_c [142/II]; a) simulation model: 1 - $\{\bar{v}_k, \sigma_k\}$ as II in Tab. 5.1, 2 - as I in Tab. 5.1.; stationary model: 1' - $\bar{v}_O = 70$ km/h, $\bar{v}_C = 55$ km/h, 2' - $\bar{v}_O = 50$ km/h, $\bar{v}_C = 45$ km/h; b) 3 - acc. to [79], 4 - acc. to [106], 5 - acc. to FHWA [48] for $\bar{v} = 50$ km/h, 6 - acc. to FHWA for $\bar{v} = 70$ km/h

1. Ekwiwalentny poziom mocy akustycznej L_{WAeq} segmentu drogi zależy przede wszystkim od natężenia ruchu Q_m , przy czym w rozpatrywanym zakresie zmian parametrów ruchu nachylenie krzywej $\langle L_{WAeq} \rangle = f(Q)$ jest stałe. Zgodnie z oczekiwaniem wynosi ono 3 dB na podwojenie natężenia ruchu Q , niezależnie od przyjętego zakresu prędkości ruchu (rys.5.3a-c).

2. Dla rozpatrywanego zakresu zmian p_c zmiany generowanego poziomu dźwięku L_{AeqT} dochodzą do 4 dB. Daje się przy tym zauważyć wyraźna zmiana nachylenia krzywej $\Delta L_{Aeq}(p)$ dla wartości $p_c < 30\%$ i $p_c > 30\%$ oraz zależność szybkości zmian od prędkości ruchu (patrz rys.5.4a).

3. Miarą wpływu średniej prędkości $\bar{v}$ strumienia ruchu na wartość poziomu L_{WAeq} jest odstęp ΔL_v między krzywymi $\langle L_{WAeq} \rangle = f(Q)$ na rys.5.4. Dla badanych zakresów prędkości różnice te wynoszą $\approx 1,5$ dB.

Tabela 5.1

Parametry rozkładu $N(\bar{v}_k, \sigma_{vk})$ prędkości ruchu v_k pojazdów k-tej klasy wg [137]

Parametr	klasa	I	II	III
$\bar{v}_k$ [km/h]	lekka	50	70	90
	średnia	50	60	80
	ciężka	45	50	70
σ_{vk} [km/h]	lekka	9	10	15
	średnia	8	9	9
	ciężka	8	9	11

5.4.3. Model hałasu elementarnego segmentu jezdni (δl_s)

Na podstawie analizy wyników badań symulacyjnych (rozdz.5.4.2), a także weryfikacji empirycznej (patrz rozdz.8.4) ustalono następujące reguły modelu hałasu elementarnego segmentu drogi [149]:

R1. Ekwiwalentny poziom mocy akustycznej L_{WAeqs} elementarnego segmentu drogi δl wynosi:

$$L_{WAeqs} = L_{WAeqo} + \Delta L_V + \Delta L_p, \quad (5.7)$$

gdzie:

L_{WAeqo} - wzorcowy ekwiwalentny poziom mocy akustycznej, wg (5.8), dla typowych warunków ruchu: $p_c = 20\%$, $\bar{v} = 50$ km/h;

ΔL_V - poprawka na prędkość ruchu, wg (5.9);

ΔL_p - poprawka na udział pojazdów klasy ciężkiej, wg (5.10).

R2. Wzorcowy ekwiwalentny poziom mocy akustycznej⁴⁷ L_{WAeqo} wynosi:

$$L_{WAeqo} = (64 \pm 1,5) + 10 \lg(Q), \quad (5.8)$$

gdzie Q - natężenie ruchu, w poj/h.

R3. Poprawka na średnią prędkość ruchu ΔL_V wynosi:

$$\begin{aligned} \Delta L_V &= 10 \lg(\bar{v}/50), \\ \bar{v} &= [\bar{v}_o (100 - p_c) + \bar{v}_c p_c] / 100, \end{aligned} \quad (5.9)$$

gdzie:

$\bar{v}_o, \bar{v}_c$ - średnia prędkość ruchu odpowiednio pojazdów klasy lekkiej i ciężkiej, w km/h,

p_c - procentowy udział pojazdów klasy ciężkiej w strumieniu ruchu.

⁴⁷W wyniku weryfikacji empirycznej stacjonarnego modelu odcinka drogi (rozdz.8) w zależności (5.8) uwzględniono poprawkę -3 dB w stosunku do wartości wyznaczonych na podstawie modelu symulacyjnego.

R4. Poprawka na udział pojazdów klasy ciężkiej ΔL_p :

$$\Delta L_p = 10 \lg [(\bar{V} + 5p_c)/(\bar{V} + 100)] , \quad (5.10)$$

w której $\bar{V}$ wg (5.9).

5.4.4. Model hałasu podobszaru jezdni

Na podstawie założeń przyjętych w rozdz.5.1 oraz we wzorze (3.18) poziom mocy akustycznej L_{WAZ} elementarnego źródła zastępczego podobszaru jezdni o długości l_s i m pasach ruchu wynosi (def.5.1, rys.5.1):

$$L_{WAZ} = 10 \lg \sum_{i=1}^m 10^{0,1 L_{WAeqs,i}} + 10 \lg(l_s/10) , \quad (5.11)$$

gdzie:

$L_{WAeqs,i}$ - ekwiwalentny poziom mocy akustycznej elementarnego segmentu (δl_s) i-tego pasa ruchu, wg (5.7).

5.4.5. Charakterystyka widmowa mocy akustycznej elementarnego segmentu drogi

Charakterystykę widmową $W_A(f_o)$ mocy akustycznej źródła elementarnego segmentu drogi δl_s wyznaczono na podstawie średniego statystycznego widma hałasu komunikacyjnego wg [152][161], którego nachylenie wynosi 3 dB/oktawę dla $f \leq 2000$ Hz oraz 6 dB/oktawę dla $f > 2000$ Hz. Do celów niniejszej pracy dokonano unormowania widma mocy względem skorygowanego poziomu mocy akustycznej L_{WA} w podany poniżej sposób.

Oznaczmy przez ΔL_{Wk} różnicę między wartością poziomu mocy $L_{Wk}(f_o)$ w k-tym pasmie oktawowym a skorygowanym poziomem mocy akustycznej L_{WA} . Poziom mocy akustycznej $L_{Wk}(f_o)$ wynosi

$$L_{Wk}(f_o) = L_{WA} + \Delta L_{Wk} , \quad (5.12)$$

Wyznaczone wartości poprawki ΔL_{Wk} , dla której charakterystyka widmowa $L_W(f_o)$ hałasu drogowego spełnia zależność (5.1) podano w tabeli 5.2.

Tabela 5.2

Poprawka ΔL_{Wk} dla widma hałasu elementarnego źródła segmentu drogi

f_o [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ΔL_{Wk} [dB]	6,7	3,7	-0,7	-2,3	-5,3	-8,3	-14,3	-20,3

5.5. Weryfikacja modelu hałasu źródła elementarnego

Celem przeprowadzonej weryfikacji była analiza dokładności odwzorowania przez stacjonarny model zmian ekwiwalentnego poziomu L_{AeqT} zachodzących w wyniku zmian parametrów ruchu. Weryfikację oparto na porównaniu wyników obliczeń wg modelu stacjonarnego oraz uzyskanych w procesie symulacji, dla takich samych warunków ruchu oraz przy założeniu propagacji nad powierzchnią odbijającą [142/II].

Dla przyjętego założenia oraz schematu zastępczego odcinka drogi (jak na rys.5.1), na podstawie wzorów (3.16) i (5.1), reguła generalna dla stacjonarnego modelu hałasu odcinka drogi ma postać:

$$L_{AeqT} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{10^{0,1} \frac{L_{WAeq,ij}^p}{2\pi d_{p,ij}^2}} \right) \quad (5.13)$$

gdzie:

- L_{AeqT} - ekwiwalentny poziom dźwięku za okres $T = 1$ h,
- $L_{WAeq,ij}^p$ - ekwiwalentny, skorygowany poziom mocy akustycznej źródła elementarnego S_{ij} , wyznaczany wg zależności (5.7-5.11),
- $d_{p,ij}$ - odległość: punkt obserwacji O - źródło S_{ij} (rys.5.1),
- N i M - liczba źródeł elementarnych ustalonych odpowiednio na długości l i szerokości w odcinka jezdni; $N \leq n$, $M \leq m$ (rys.5.1).

Po uwzględnieniu deterministycznego charakteru modelu zastępczego oraz losowego charakteru wyniku symulacji kryterium weryfikacji jest następujące:

$$|\langle \tilde{L}_{AeqT} \rangle - L_{AzT}| \leq \varepsilon \quad \wedge \quad \varepsilon = 1 \text{ dB} ,$$

gdzie:

- $\langle \tilde{L}_{AeqT} \rangle$ - średnia wartość ekwiwalentnego poziomu hałasu za okres $T = 1$ h, którą wyznaczamy w procesie wielokrotnej symulacji dla tych samych parametrów ruchu,
- L_{AzT} - poziom hałasu obliczony na podstawie reguł modelu stacjonarnego, $L_{AzT} = L_{AeqT}$ wg (5.13).

Przeprowadzono równocześnie analizę porównawczą wyników uzyskanych na podstawie opracowanego modelu zastępczego oraz metod prognozowania hałasu drogowego podanych w [48][79][106], w zakresie obowiązywania porównywanych modeli. Analizowano wpływ procentowego udziału p_c pojazdów klasy ciężkiej oraz średniej prędkości ruchu $\bar{V}$ na wartość prognozowanego poziomu hałasu drogowego. Wyniki weryfikacji oraz analizy porównawczej, które przedstawiono syntetycznie⁴⁸ na rysunkach 5.3 i 5.4 oraz w tabeli 5.3, wskazują, że w badanym zakresie zmian parametrów ruchu opracowany model zastępczy spełnia przyjęte kryterium weryfikacyjne (patrz rys.5.3 i 5.4a) oraz wykazuje dobrą zgodność prognozowanych zmian poziomu hałasu drogowego w funkcji podstawowych parametrów ruchu z innymi porównywanymi metodami (rys.5.4b, tab.5.3).

Tabela 5.3

Zmiany poziomu hałasu ΔL_V w funkcji średniej prędkości ruchu $\bar{V}$ dla stałej wartości $p_c = 20\%$ [142/II].
 $\bar{V}_r$ wg wzoru (5.9) dla $\bar{V}_O = 70$ km/h, $\bar{V}_C = 55$ km/h.

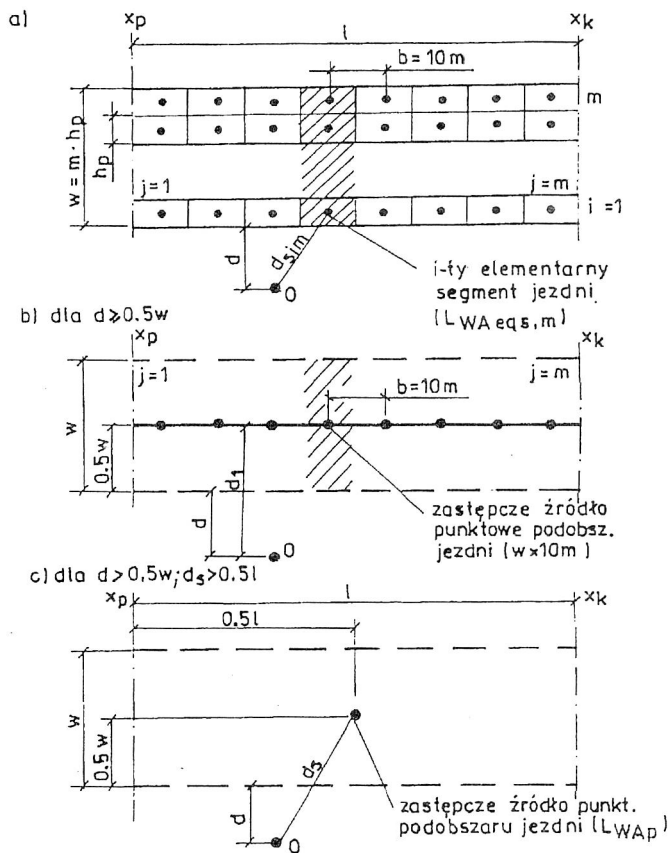
$\Delta L_V = L_{AeqT}(\bar{V}) - L_{AeqT}(\bar{V}_r)$ [dB]			
$\bar{V}_O/\bar{V}_C$ [km/h]	55/40	70/55	90/70
wg rozdz.5	-1,3	0	+1,1
wg rozdz.4	-(1,4+1,8)	0	+(1,1+1,5)
wg [79]	-0,9	0	+1,1
wg [48]	-0,9	0	+1,2
wg [106]	0,0	0	+2,3

5.6. Modele zastępcze hałasu odcinka drogi

W metodach prognozowania hałasu ruchu drogowego do opisu propagacji dźwięku przyjmuje się na ogół model źródła liniowego o skończonej długości l [1][21][48/CH.32][79][161]. Odcinek drogi o szerokości w i długości l odpowiada kryterium źródła liniowego dla ograniczonego obszaru obserwacji, gdy prostopadła odległość d punktu obserwacji od osi drogi spełnia warunek

$$d_{g1} < d < d_{g2} , \quad (5.14)$$

⁴⁸ Parametry ruchu nie są czynnikami niezależnymi, np. średnia prędkość ruchu $\bar{V}$ zależy od struktury strumienia pojazdów, stąd wypadkowy wpływ tych czynników ujmowany jest w analizowanych metodach w różny sposób, co utrudnia ich bezpośrednie porównanie.

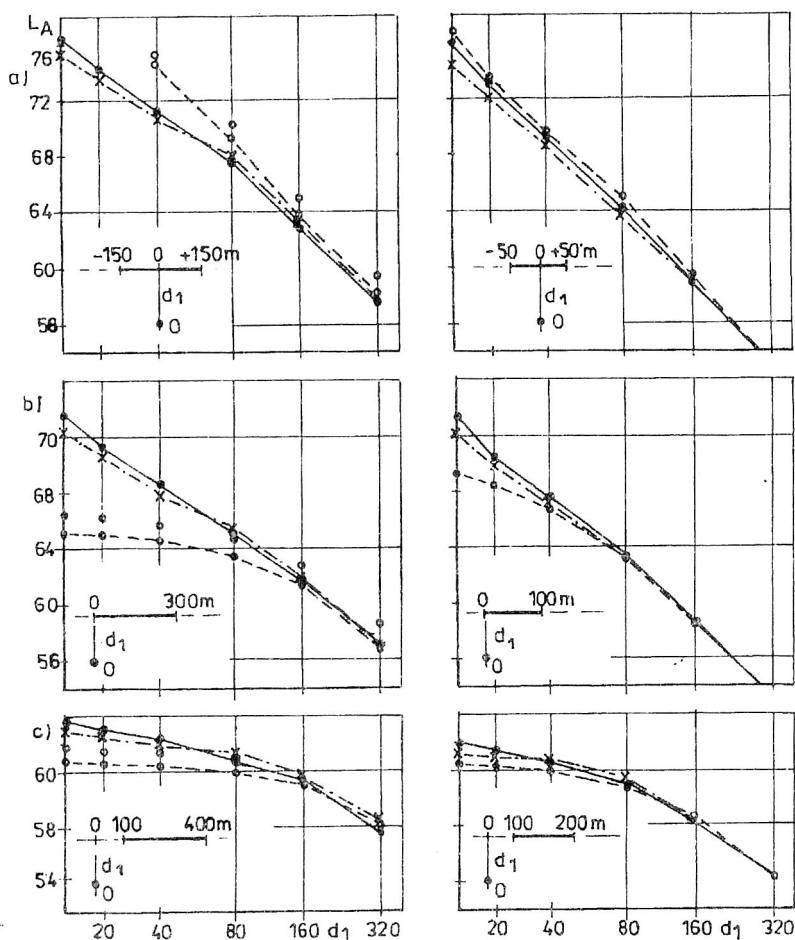


Rys. 5.5. Schematy zastępcze modeli odcinka drogi: a) źródło powierzchniowe, b) źródło liniowe, c) źródło punktowe [142/II]

Fig. 5.5. Substitute schemes of road segment models: a) plane source, b) line source, c) point source [142/II]

przy czym; d_{g1} i d_{g2} są odległościami granicznymi, które wynikają z wymiarów geometrycznych odcinka drogi oraz położenia punktu obserwacji (rozdz.3.5.5) [98][125]. W obszarze obserwacji, dla którego odległości d spełniają nierówność, $d < d_{g1}$, rozkład poziomy dźwięku zależy od struktury wewnętrznej źródła i stosowanie modelu źródła liniowego jest obarczone błędem. Dla tego obszaru odcinek drogi ma cechy powierzchniowego źródła hałasu. Dla odległości $d > d_{g2}$ odcinek drogi wykazuje cechy źródła punktowego.

Kryteria obowiązywania modeli źródła liniowego i punktowego dla m-pasowego odcinka jezdni o długości l (rys.5.5) ustalono na podstawie analizy numerycznej rozkładu pola akustycznego, zgodnie z kryterium weryfikacyjnym (3.2) dla $\varepsilon = 1$ dB. Za wartość odniesienia $\langle \bar{L}_{def} \rangle$



Rys. 5.6. Porównanie zmian poziomu dźwięku w funkcji odległości d od odcinka ośmiopasowej drogi o szerokości $w=28$ m i różnej długości l [147]: $(\cdot-\cdot-)$ - model odcinka drogi dla $\sigma=30000$ [w cgs], $(\times-\times-\times)$ - model źródła liniowego dla $k=1.05$, $(\circ-\circ-\circ)$ i $(\circ\circ)$ - model źródła punktowego dla $k=1.025$ i $k=1$; a) przekrój obserwacji w osi symetrii odcinka, b) na końcu odcinka, c) poza odcinkiem; parametry ruchu: $Q=500$ poj/h/pas, $p_c=20\%$, $\bar{V}_1/\bar{V}_c = 50/40$ km/h

Fig. 5.6. Variation of sound level with distance d from an eight-lane roadway of width $w=28$ m and different lengths l [147]: $(\cdot-\cdot-)$ - model of road segment for $\sigma=30000$ [w cgs units], $(\times-\times-\times)$ - model of line source for $k=1.05$, $(\circ-\circ-\circ)$ and $(\circ\circ)$ - model of points source for $k=1.025$ and $k=1$; a) cross section of the observation in the axis of symmetry of a segment, b) at the end of a segment, c) outside the segment; traffic parameters: $Q=500$ vehicles/h/lane, $p_c=20\%$, $\bar{V}_1/\bar{V}_c = 50/40$ km/h

przyjęto w tym przypadku wyniki uzyskane na podstawie obliczeń wg modelu zastępczego przy maksymalnym stopniu dyskretyzacji obszaru jezdni [142/II][147][149]. Przykładowe wyniki obliczeń dla cztero- i ośmiopasowego odcinka drogi o długości $l = 300, 200$ i 100 m, dla różnych położań punktów obserwacji, pokazano na rys.5.6.

5.6.1. Model źródła liniowego

Odcinek drogi o szerokości w i długości l można zastąpić modelem źródła liniowego z dyskretnie rozłożoną mocą akustyczną, które jest umieszczone w osi jezdni (rys.5.5b), jeżeli spełniony jest warunek:

$$W1: \quad d \geq 0,5 w . \quad (5.15)$$

Elementarne źródło dźwięku reprezentuje w tym przypadku segment drogi o wymiarach ($w \times 10$ m). Równoważny, w sensie def.3.5, poziom mocy akustycznej tego źródła wynosi (patrz wzór 5.11)

$$L_{WA,1} = 10 \lg \sum_{i=1}^m 10^{0,1 L_{WAeqs,i}} , \quad (5.16)$$

przy czym; m i L_{WAeqs} jak we wzorze (5.11).

Jeżeli natężenie ruchu na wszystkich pasach ruchu jest takie samo ($Q = Q_i$), to (5.16) przyjmuje postać:

$$L_{WA,1} = L_{WAeqs}(Q) + 10 \lg(m) . \quad (5.17)$$

Z pracy [98] wynika, że jeżeli zachodzi relacja $d \gg \delta l_s$, to linia źródeł punktowych może być traktowana jak źródło liniowe z równomiernie rozłożoną mocą akustyczną. Poziom dźwięku L_A w odległości d od źródła liniowego o skończonej długości l i poziomie całkowitej mocy akustycznej L_{WA} (umieszczonego na powierzchni idealnie odbijającej) dany jest wzorem [98]:

$$L_A = L_{WAO} - 10 \lg(2) - 10 \lg(d) + 10 \lg(\alpha/\pi) , \quad (5.18)$$

gdzie:

L_{WAO} - poziom mocy akustycznej przypadającej na jednostkę długości, który wynosi

$$L_{WAO} = L_{WA} - 10 \lg(l) , \quad (5.19)$$

α - kąt widzenia odcinka źródła liniowego z punktu obserwacji.

Dla ustalonego w rozdz.5.2 sposobu dyskretyzacji obszaru jezdni ($\delta l_s = 10$ m), na podstawie wzorów (5.16)-(5.19), zachodzi:

$$L_{WAO} = L_{WA,1} - 10 . \quad (5.20)$$

5.6.2. Model źródła punktowego

Odcinek drogi o szerokości w i długości l można zastąpić wszechkierunkowym źródłem punktowym, o równoważnej (w sensie def.3.5) mocy akustycznej W_{Ap} , które jest umieszczone w środku geometrycznym odcinka jezdni, jeżeli spełniony jest warunek (rys.5.5c) [149]:

$$W2: \begin{cases} d \geq 0,5l & \text{dla przekroju w osi symetrii odcinka drogi,} \\ d \geq 0,7l & \text{dla przekroju na końcach odcinka drogi,} \\ d \geq l & \text{dla przekroju poza odcinkiem drogi.} \end{cases}$$

Zastępcze źródło punktowe reprezentuje w tym przypadku segment drogi o wymiarach ($w \times l$) m, a poziom mocy akustycznej $L_{WA,p}$ na podstawie wzoru (5.11) wynosi (rys.5.5):

$$L_{WA,p} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n 10^{0,1 L_{WAeqs,i}} \right), \quad (5.21)$$

gdzie:

n - liczba elementarnych segmentów drogi,

m i L_{WAeqs} - jak we wzorze (5.11).

Jeżeli natężenie ruchu na wszystkich pasach ruchu jest takie samo ($Q_i = Q$), to (5.21) przyjmuje postać:

$$L_{WA,p} = L_{WAeqs}(Q) + 10 \lg(m \cdot n). \quad (5.22)$$

5.7. Uwagi końcowe

W rozdz.5 wykazano, że dla wskaźnika oceny hałasu L_{AeqT} zbiór stacjonarnych, wszechkierunkowych punktowych źródeł dźwięku jest równoważnym, w sensie def.3.8, modelem hałasu odcinka drogi.

Dla przyjętych zasad dyskretyzacji obszaru jezdni ustalono reguły estymacji poziomu mocy akustycznej źródeł elementarnych S_{ij} , reprezentujących w modelu emisję dźwięku hałasu z jednorodnego podobszaru jezdni, w zależności od podstawowych parametrów charakteryzujących warunki ruchu.

Ustalono także kryteria obowiązywania modelu liniowego oraz punktowego źródła dźwięku dla odcinka arterii oraz podano reguły estymacji parametrów akustycznych tych modeli.

Przykłady wykorzystania modelu stacjonarnego w prognozowaniu hałasu drogowego w złożonych warunkach przestrzennych podano w rozdz.7 i 8.

6. GEOMETRYCZNY MODEL PROPAGACJI FALI AKUSTYCZNEJ W OGRANICZONEJ PRZESTRZENI TRÓJWYMIAROWEJ

6.1. Wprowadzenie

W niniejszym rozdziale przedstawiono uogólniony model propagacji fali akustycznej w ograniczonej przestrzeni trójwymiarowej⁴⁹ sformułowany przez autorkę na gruncie teorii akustyki geometrycznej, przy założeniu metody obrazów pozornych jako metody realizacji modelu numerycznego. W modelu tym uwzględniono wszystkie podstawowe elementarne zjawiska akustyczne związane z propagacją dźwięku w przestrzeni ograniczonej, w tym zjawisko wielokrotnej dyfrakcji. Uogólniony model stanowi podstawę do konstruowania numerycznych modeli prognozujących parametry pola akustycznego występującego w złożonych układach przestrzennych⁵⁰. W kolejnych rozdziałach pokazano sposób wykorzystania tego modelu do prognozowania hałasu drogowego w obszarze zurbanizowanym (rozd.7) oraz emisji hałasu z obszaru powierzchniowego źródła hałasu o złożonej strukturze przestrzennej (rozd.8).

Problem sformułowania geometrycznego modelu propagacji dźwięku w dowolnym układzie przestrzennym polega na przyjęciu takiego analitycznego opisu przestrzeni oraz występujących w niej elementarnych zjawisk akustycznych, aby możliwe było ustalenie zbioru zalgorytmizowanych reguł tworzących model matematyczny (patrz rozdz.2.1). Matematyczny opis zjawiska odbicia fali akustycznej od powierzchni jest znany. Ścisła teoria odbicia fal kulistych została rozwinięta już w latach 50. przez Morsa, Bolta i Ingarda [143], a następnie rozwijana między innymi przez Attenborougha [2] [5], Chiena i Sorokę [16][17], Donata [29], Filippiego i Habaulta [37][38], Thomassona [179], Wenzela [184] w odniesieniu do odbicia fali akustycznej od powierzchni gruntu. Brakuje natomiast ciągle charakterystyk fizycznych współczynników odbicia, zarówno dla odbicia prostego, jak i rozproszonego, dla większości rzeczywistych powierzchni odbijających. Wyjątek stanowi powierzchnia gruntu, dla której podane zostały zależności opisujące ciśnieniowy współczynnik odbicia, a także wyznaczono wartości oporności przepływu σ dla typowych powierzchni. Zagadnienie to omówiono szerzej w rozdz.7.2.3.

⁴⁹Przestrzeń trójwymiarowa - przestrzeń, w której do określenia położenia dowolnego punktu konieczne są trzy niezależne współrzędne.

⁵⁰Model ten wykorzystany został także do modelowania parametrów pola akustycznego ekranowanych źródeł dźwięku w pomieszczeniach o charakterze przemysłowym - Temat badawczy *Ekranowanie akustyczne stanowisk pracy*, realizowany pod kierunkiem autorki w ramach CPBR 11.1. Raporty Politechniki Wr. Nr: I-28/SPR-031/86, I-28/SPR-008/88, I-28/SPR-017/896.

Problem analitycznego opisu pola akustycznego z uwzględnieniem zjawiska dyfrakcji jest bardziej złożony. Składają się na to zarówno brak opisu analitycznego zjawiska dyfrakcji na obiektach o dowolnych kształtach, jak i rozwiązania analitycznego zjawiska wielokrotnej dyfrakcji. Ze względu na skomplikowany charakter zjawiska dyfrakcji, powodujący poważne trudności matematyczne, ścisłe rozwiązanie tego problemu w postaci analitycznej zależności uzyskano dla prostego przypadku półnieskończonego, cienkiego ekranu o jednej krawędzi uginającej. Do najbardziej znanych teorii dyfrakcji należą teorie Sommerfelda, Kirchhoffa-Fresnela, Younga-Rubinowicza [131] i MacDonalda oraz Kellera [77]. Przegląd oraz porównanie tych teorii z punktu widzenia zastosowania do opisu skuteczności ekranów akustycznych można znaleźć w pracach Isei i innych [55], Embletona [32] oraz Waleriana [182]. Ze względu na ograniczony zakres zastosowania rozwiązania ścisłego, podjęto wiele prac (teoretycznych i eksperymentalnych) zmierzających do ustalenia modeli matematycznych zjawiska dyfrakcji bardziej przydatnych w praktycznym zastosowaniu [32][33][42][58][75][76][81][85][100][101][122][123][128][178][193][194].

W badaniach tych można wydzielić dwa zasadnicze kierunki.

1. Prace zmierzające do określenia skuteczności ekranowania dla przeszkody cienkiej, na drodze modyfikacji i uproszczeń ścisłych rozwiązań zagadnienia dyfrakcji [42][43][58][75][76][81][101].

2. Badania mające na celu rozwinięcie teorii dyfrakcji dla różnych kształtów barier takich jak narożniki⁵¹ oraz bariery grube, a także uwzględnienie wpływu pochłaniających właściwości powierzchni ekranu na jego skuteczność [85][101][122][123][194].

Większość podanych w literaturze zależności jest rozwinięciem lub rozszerzeniem optycznej teorii dyfrakcji. Obowiązują one dla obszaru cienia akustycznego, w którym tłumienie lub skuteczność bariery akustycznej wyznacza się jako funkcję bezwymiarowej zmiennej, określanej na podstawie geometrii układu: źródło - krawędź uginająca - punkt obserwacji, tzw. stałej Fresnela. Z tego względu rozwiązania te znajdują ograniczone zastosowanie w modelowaniu pola akustycznego, gdzie wymagane jest rozwiązanie obowiązujące w całej przestrzeni obserwacji.

Zjawisko wielokrotnej dyfrakcji na niezależnych krawędziach uginających (należących do różnych obiektów) nie ma do tej pory dokładnego rozwiązania analitycznego. Wynika to z faktu, że w wyniku ugięcia następuje deformacja czoła fali akustycznej, a natężenie promienia ugiętego zależy silnie od jego kierunku [131]. Geometryczna teoria

⁵¹W Polsce zagadnieniem dyfrakcji na narożu zajmował się Wyrzykowski (np. *Ugięcie fali na narożu*, *Archiwum Akustyki* 1982, 17(2), 143-154). Ponieważ analiza dotyczy pola bliskiego w otoczeniu krawędzi, nie znajduje zastosowania w rozważanej w niniejszej pracy problematyce.

Kellera określa podstawy teoretyczne poszukiwania modeli zastępczych tego zjawiska. Można tu wymienić prace Yuzawy [193], Kurzego [85], Hayeka [49]. W niniejszej pracy do opisu zjawiska dyfrakcji wykorzystano prace Pierce'a, który na podstawie geometrycznej teorii Kellera [77] podał asymptotyczne rozwiązanie zagadnienia dyfrakcji na narożu oraz na podwójnej krawędzi bariery szerokiej [122][123].

Przy formułowaniu analitycznego opisu modelu wprowadzono pojęcie transmitancji T , na zasadzie analogii do teorii obwodów, w której funkcja transmitancji⁵² charakteryzuje odpowiedź układu na sygnał wymuszający. Transmitancję układu definiuje się jako iloraz sygnału wyjściowego X_{wy} (reakcja) do sygnału wejściowego X_{we} (pobudzenie): $T = X_{wy} / X_{we}$, przy czym sygnałami X_{we} i X_{wy} mogą być dowolne wielkości. W teorii liniowych obwodów np. są to: natężenie prądu, napięcie lub moc elektryczna. W niniejszej pracy jest rozpatrywana odpowiedź ograniczonego układu przestrzennego na pobudzenie sygnałem ciągłym emitowanym przez punktowe źródło dźwięku. Za sygnały wejściowy X_{we} i wyjściowy X_{wy} przyjmuje się wielkości charakteryzujące pole akustyczne w wybranych punktach układu przestrzennego: ciśnienie akustyczne p lub kwadrat ciśnienia akustycznego p^2 .

6.2. Sformułowanie analityczne geometrycznego modelu propagacji

6.2.1. Założenia

Przy formułowaniu uogólnionego geometrycznego modelu propagacji fali akustycznej w ograniczonej przestrzeni trójwymiarowej, przyjęto następujące założenia wyjściowe:

1. Zjawiska elementarne

Elementarnymi zjawiskami akustycznymi decydującymi o wypadkowym polu akustycznym w rozpatrywanej przestrzeni ograniczonej są:

- geometryczne rozprzestrzenianie się fali akustycznej,
- pochłanianie w powietrzu,
- odbicia od powierzchni ograniczających przestrzeń,
- ugięcia na krawędziach obiektów przestrzeni,
- przenikanie dźwięku przez przegrodę o skończonej izolacyjności.

2. Przestrzeń propagacji

Każdą rzeczywistą przestrzeń propagacji fali akustycznej można zastąpić modelem trójwymiarowej przestrzeni ograniczonej, który składa

⁵²Inaczej funkcja przenoszenia - *Encyklopedia techniki. Elektronika*, WNT, Warszawa 1983.

się z płaszczyzn odbijających oraz krawędzi uginających, umieszczonych w ośrodku stratnym. Zakłada się przy tym, iż są znane częstotliwościowe charakterystyki parametrów akustycznych przestrzeni (ciśnieniowe współczynniki odbicia oraz współczynnik pochłaniania w ośrodku).

Uwzględniając założenia (1) wprowadza się dwie kategorie płaszczyzn odbijających:

- płaszczyzny *nieprzezroczyste*,
- płaszczyzny *przezroczyste*,

oraz dwie kategorie krawędzi uginających:

- *pojedynczą* krawędź uginającą,
- *podwójną* krawędź uginającą.

Płaszczyzna *nieprzezroczysta*, reprezentująca w modelu sztywną powierzchnię odbijającą, jest płaszczyzną odbijającą jednostronną, tzn. że fala akustyczna padająca na tę płaszczyznę ulega odbiciu tylko od wyróżnionej, aktywnej strony płaszczyzny.

Płaszczyzna *przezroczysta*, reprezentująca przegrodę o skończonej izolacyjności akustycznej, jest płaszczyzną odbijającą dwustronnie (obie strony płaszczyzny są aktywne), przy czym fala akustyczna padająca na tę płaszczyznę ulega częściowo odbiciu, a częściowo przenika przez płaszczyznę na jej drugą stronę.

Pojedyncza krawędź uginająca jest nieskończenie długą krawędzią ekranu cienkiego o przekroju w kształcie klina.

Podwójną krawędź uginającą tworzy para krawędzi uginających oddalonych od siebie o odległość $w > \lambda$, które należą do tego samego fizycznego obiektu przestrzeni i mają wspólną płaszczyznę (λ - długość fali akustycznej).

3. Źródło dźwięku

Fala akustyczna emitowana jest przez punktowe, wszechkierunkowe źródło dźwięku S , o znanej charakterystyce częstotliwościowej poziomu mocy akustycznej $L_W(f)$.

4. Punkty obserwacji

Punkty obserwacji $\{O_i\}$ znajdują się w dowolnych punktach ograniczonej przestrzeni propagacji.

5. Propagacja fali akustycznej

Zakłada się, że fale akustyczne na drodze od źródła S_i do punktu obserwacji O_k ulegają wielokrotnie odbiciom od płaszczyzn oraz ugięciom na krawędziach uginających. Mogą one także przenikać przez płaszczyzny przezroczyste.

6. Parametry pola akustycznego

Parametrem charakteryzującym pole akustyczne jest charakterystyka częstotliwościowa poziomu ciśnienia akustycznego (w pasmie częstotliwości-

ci o szerokości tercji lub oktawy) oraz skorygowany zgodnie z krzywą A poziom dźwięku L_A .

Źródła dźwięku, płaszczyzny odbijające, krawędzie uginające oraz punkty obserwacji tworzą obiekty aktywne modelu ograniczonej przestrzeni propagacji.

6.2.2. Struktura modelu

Jak stwierdzono w rozdz.2.4, istotą metod geometrycznego modelowania jest założenie, że fala akustyczna, emitowana przez punktowe źródło dźwięku, może być reprezentowane przez promienie dźwiękowe, które rozchodząc się podobnie jak promienie świetlne, podlegają prawom odbicia oraz ugięcia (dyfrakcji). Mogą one także przenikać przez przegrody przezroczyste. Przejście fali akustycznej między źródłem S_i i punktem obserwacji O_k reprezentowane jest zbiorem wszystkich możliwych tras promieni dźwiękowych. W celu sformułowania analitycznego opisu modelu propagacji fali akustycznej oraz jego algorytmizacji, w pracy, wprowadza się pojęcie transmitancji⁵³ ciśnieniowej (T_p) trasy promienia dźwiękowego, transmitancji ciśnieniowej wypadkowej (T_{pw}) oraz transmitancji energetycznej (T_{ew}) [141]:

def.6.1. Transmitancję ciśnieniową (T_p) trasy definiuje się jako stosunek ciśnienia akustycznego $p_k(0)$ na końcu oraz ciśnienia akustycznego p_o na początku (w odległości $r_o = 1$ m od źródła S_i) analizowanej i-tej trasy:

$$T_{pi} = \frac{p_k(0)}{p_o} = |T_{pi}| \exp(j\Psi_i), \quad (6.1)$$

gdzie; $|T_{pi}|$ jest modulem, a Ψ_i fazą zespolonej transmitancji T_{pi} .

Transmitancja T_{pi} charakteryzuje warunki propagacji wzdłuż i-tej trasy promienia dźwiękowego.

def.6.2. Transmitancja ciśnieniowa wypadkowa T_{pw} zdefiniowana jest jako stosunek wypadkowego ciśnienia akustycznego $p_w(0)$ w punkcie obserwacji O do ciśnienia akustycznego p_o , jak w def.6.1.:

$$T_{pw} = \frac{p_w(0)}{p_o}. \quad (6.2)$$

Transmitancja wypadkowa T_{pw} , charakteryzująca przejście fali akustycznej między źródłem S_i i punktem O_k , jest odpowiedzią pomieszczenia na pobudzenie sygnałem akustycznym. Jeżeli rozpatrujemy sygnał ciągły oraz pole

⁵³ Transmitancja (T) jest funkcją częstotliwości f (wszystkie wielkości i parametry akustyczne występujące we wzorach są funkcjami częstotliwości). W rozdz.6, we wzorach pominięto oznaczenie zależności od f dla uproszczenia ich zapisu.

w stanie ustalonym, to zgodnie z założeniami modelu geometrycznego oraz def.6.1 i 6.2, transmitancja T_{pw} jest superpozycją transmitancji T_{pi} wszystkich możliwych tras między źródłem S_i i punktem obserwacji O_k .

Stąd:

$$T_{pw}(f) = \sum_{i=1}^n T_{pi}(f) , \quad (6.2a)$$

gdzie:

f - częstotliwość fali akustycznej,

n - liczba tras promieni dźwiękowych.

def.6.3. Transmitancja energetyczna T_{ew} , zwana dalej transmitancją układu przestrzennego, zdefiniowana jest jako stosunek kwadratu wypadkowego ciśnienia p_w w punkcie obserwacji O_k do kwadratu ciśnienia p_o w punkcie odniesienia, jak w def.6.1.:

$$T_{ew} = p_w^2 / p_o^2 . \quad (6.3)$$

Na podstawie def.6.2 zachodzi:

$$T_{ew}(f) = |T_{pw}(f)|^2 = \left| \sum_{i=1}^n T_{pi}(f) \right|^2 . \quad (6.3a)$$

Transmitancja ciśnieniowa trasy T_p

Wyprowadzenie analitycznego opisu transmitancji T_p trasy zawierającej wielokrotne odbicia i ugięcia oparto na heurystycznym założeniu, że transmitancja T_p i-tej trasy jest iloczynem⁵⁴ transmitancji wynikającej z geometrycznego rozprzestrzeniania się fali kulistej wzdłuż trasy promienia dźwiękowego, zwanej dalej transmitancją odległościową T_d , oraz transmitancji wprowadzanych w wyniku każdorazowej interakcji promienia dźwiękowego oraz dowolnego obiektu przestrzeni związanego z analizowaną trasą, które nazwano transmitancjami obiektowymi T_o [73] [74][141].

def.6.4. Transmitancja odległościowa T_d reprezentuje stratę energii akustycznej, która wynika z geometrycznego rozprzestrzeniania się fali akustycznej na odległość d oraz pochłanianiu w ośrodku. Transmitancja T_d równa się

$$T_d = \exp(-md) \frac{\exp(ikd)}{kd} , \quad (6.4)$$

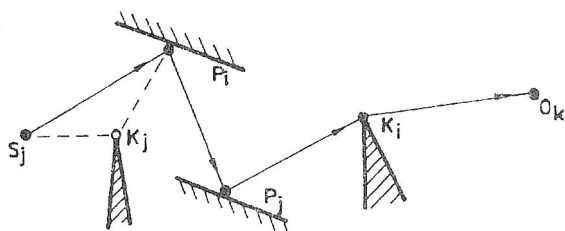
przy czym;

d - całkowita długość trasy promienia dźwiękowego,

m - współczynnik pochłaniania w ośrodku,

k - stała falowa.

⁵⁴ Na zasadzie analogii do transmitancji wypadkowej łańcuchowego połączenia układów, w którym każdy następny element nie wpływa na pracę elementu poprzedniego [Lagasse J., Teoria obwodów elektrycznych, WNT 1965].



Rys. 6.1. Schemat trasy promienia dźwiękowego opisanej krzywą łamaną $\{S_i-P_i-P_j-K_i-O_k\}$: S_i - i-te źródło dźwięku, P_i (P_j) - i-ta (j-ta) płaszczyzna odbijająca, K_i (K_j) - i-ta (j-ta) krawędź uginająca, O_k - k-ty odbiornik, $(\cdot)$ - węzeł trasy, $(\circ)$ - węzeł związany z trasą

Fig. 6.1. Scheme of the sound ray path described by a broken line $\{S_i-P_i-P_j-K_i-O_k\}$: S_i - i-th sound source, P_i (P_j) - i-th (j-th) reflecting plane, K_i (K_j) - i-th (j-th) diffracting edge, O_k - k-th receiver, $(\cdot)$ - ray path node, $(\circ)$ - node connected with the ray path

def.6.5. Transmitancja obiektowa T_o

Każdorazowa interakcja promienia dźwiękowego oraz obiektu przestrzeni łączy się ze zmianą energii akustycznej. Zakłada się, że punkty interakcji (punkty odbicia, ugięcia, przenikania) tworzą węzły⁵⁵ przestrzeni, tzn. obiekty, których transmitancja T_o wynosi

$$T_o = \frac{p_{wy}}{p_{we}}, \quad (6.5)$$

gdzie:

p_{we} - ciśnienie akustyczne na wejściu węzła,
 p_{wy} - ciśnienie akustyczne na wyjściu węzła.

Jak wykazano w rozdz.(6.3) i (6.4) transmitancja obiektowa T_o może reprezentować straty energii akustycznej w wyniku odbicia, ugięcia oraz przenikania przez przegrodę promienia dźwiękowego lub straty w wyniku rozpraszającego wpływu krawędzi uginającej (w sytuacji, gdy promień ulega odbiciu lub przechodzi w pobliżu krawędzi). W pierwszym przypadku węzeł przestrzeni jest także węzłem trasy promienia dźwiękowego, czyli punktem, w którym następuje zmiana kierunku promienia (rys.6.1). W drugim przypadku węzeł przestrzeni wnosi tylko dodatkowe tłumienie bez zmiany kierunku promienia dźwiękowego i stąd nazwany został węzłem związanym z trasą.

⁵⁵ Analogicznie do węzłów grafu liniowego, Narsing Deo, *Teoria grafów i jej zastosowanie w technice i informatyce*, PWN 1980.

Na podstawie def. (6.1), (6.4) i (6.5) transmitancję T_p i-tej trasy o całkowitej długości d_i , która zawiera N węzłów trasy oraz M węzłów związanych wynosi:

$$T_{pi} = \exp(-md_i) \frac{\exp(ikd_i)}{kd_i} \prod_n^N T_o(o_n) \prod_m^M T_{oc}(o_m), \quad (6.6)$$

gdzie:

$T_o(o_n)$ - transmitancja obiektowa dla n -tego węzła trasy (rozdz. 6.3 i 6.4),

$T_{oc}(o_m)$ - transmitancja obiektowa m -tego węzła związanego (rozdz. 6.4.4).

Uwzględnivszy zależność transmitancji T_p od częstotliwości można zapisać:

$$T_{pi}(f) = |T_{pi}(f)| \exp(\Psi_i) = |T_{pi}(f)| \exp\left(\frac{\omega d_i}{c} + \sum_n \psi_n\right), \quad (6.7)$$

gdzie:

$|T_{pi}|$ - moduł transmitancji i-tej trasy,

Ψ_i - faza transmitancji i-tej trasy,

ω - pulsacja, ($\omega = 2\pi f$),

ψ_n - faza transmitancji obiektowej n -tego węzła i-tej trasy.

W przyjętej koncepcji modelu propagacji zakłada się, że płaszczyzny odbijające oraz krawędzie uginające traktowane mogą być jako pewne elementy wprowadzające zaburzenie na trasie fali kulistej rozchodzącej się z punktowego źródła dźwięku S_i do punktu obserwacji O_k . W wyniku następuje zmiana kierunku dalszego biegu promienia dźwiękowego, a także zmiana amplitudy i fazy związanego z nim ciśnienia akustycznego. Jest to klasyczny sposób podejścia do modelowania zjawiska odbicia. W przypadku zjawiska odbicia przyjęty model, niezależnie od charakteru odbicia (proste czy rozproszone), zgodny jest z fizyką zjawiska. Natomiast w przypadku modelu dyfrakcji jest to założenie upraszczające, gdyż wskutek ugięcia następuje deformacja czoła fali akustycznej [77][131]. Wynika z tego ograniczenie zakresu stosowania modelu do przypadków, gdy odległość d_{kk} między kolejnymi krawędziami spełnia warunek $d_{kk} \gg k\lambda$, gdzie k jest stałą falową. Modele zjawisk elementarnych oraz sposób wyznaczania ich transmitancji obiektowych T_o i T_{oc} omówiono w kolejnych podrozdziałach.

6.3. Model odbicia i przenikania przez płaszczyznę

6.3.1. Transmitancja odbicia od płaszczyzny nieprzezroczystej

W metodzie źródeł pozornych odbicie promienia dźwiękowego od płaszczyzny P reprezentowane jest przez źródło pozorne S' , które jest lustrzanym odbiciem rzeczywistego źródła S względem tej płaszczyzny (rys.6.1a). Ciśnienie akustyczne p_r fali odbitej wynosi

$$p_r = R_p(\varphi) \frac{\exp(ikr')}{kr'} , \quad (6.8)$$

gdzie:

R_p - ciśnieniowy współczynnik odbicia od płaszczyzny, wg (6.10),
 r' - odległość między pozornym źródłem S' i punktem obserwacji O.

Transmitancja obiektowa odbicia $T_o(R)$, na podstawie def.6.5 oraz wzorów (6.5), (6.6) i (6.8) równa jest współczynnikowi odbicia R_p , co można zapisać

$$T_o(R) = R_p(\varphi) = |R_p| \exp(j\psi_R) , \quad (6.9)$$

gdzie:

$|R_p|$ - moduł współczynnika odbicia,

ψ_R - przesunięcie fazowe.

Dla powierzchni lokalnie reagującej⁵⁶ ciśnieniowy współczynnik odbicia R_p jest funkcją zespolonej impedancji akustycznej Z powierzchni odbijającej oraz kąta φ padania promienia dźwiękowego. Dla fali płaskiej ogólna zależność ma postać [143]

$$R(\varphi) = \frac{Z \cos \varphi - \rho_o c}{Z \cos \varphi + \rho_o c} , \quad (6.10)$$

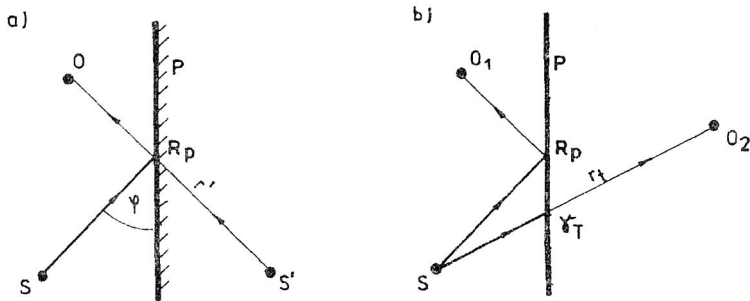
w której $\rho_o c$ - oporność akustyczna powietrza.

Właściwości współczynnika odbicia od powierzchni gruntu dla fali kulistej omówiono w rozdz.7.2.2.

6.3.2. Transmitancja przejścia dźwięku przez płaszczyznę przezroczystą

Promień dźwiękowy padający na płaszczyznę przezroczystą odbija się od płaszczyzny (zgodnie z modelem podanym w rozdz.6.3.1) oraz przenika przez tę płaszczyznę i rozchodzi się po jej drugiej stronie bez zmiany

⁵⁶ Impedancja Z powierzchni lokalnie reagującej nie zależy od kąta padania fali akustycznej [114].



Rys. 6.2. Geometria układu dla odbicia prostego od płaszczyzny: a) nieprzezroczystej, b) przezroczystej

Fig. 6.2. Geometry for a specular reflection from the plane: a) non-transparent, b) transparent

kierunku (rys.6.2b). Fala akustyczna przenikająca przez płaszczyznę ulega tłumieniu, przy czym wielkość tego tłumienia zależy od struktury przegrody reprezentowanej w modelu przez płaszczyznę. Oznaczając przez γ_p współczynnik przenikalności akustycznej przez przegrodę, ciśnienie akustyczne p_t w punkcie O za przegrodą wynosi (rys.6.2b)

$$p_t = \gamma_p \frac{\exp(ikr_t)}{kr_t} . \quad (6.11)$$

Na podstawie def.6.1 i 6.5 oraz wzorów (6.5), (6.6) i (6.11) odpowiednia transmitancja obiektowa równa jest

$$T_{ot} = \gamma_p . \quad (6.12)$$

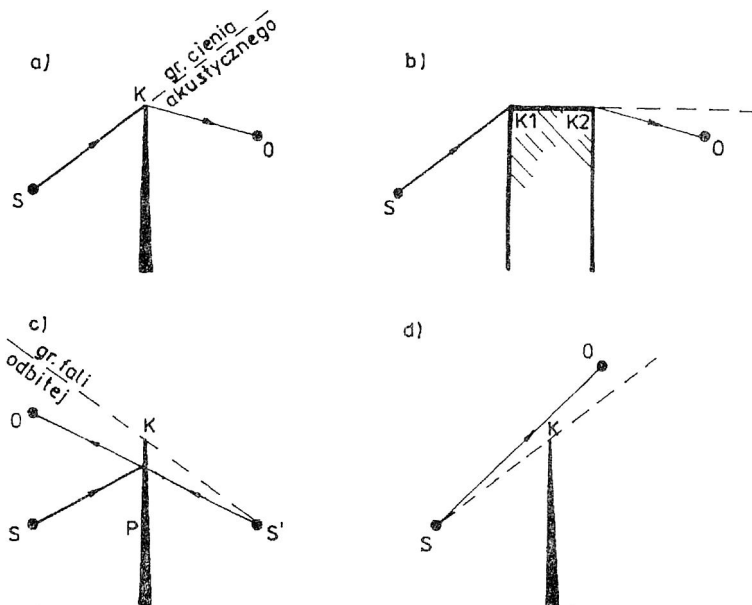
6.4. Model ugięcia promienia dźwiękowego

Przyjawszy za podstawę interpretację fizyczną zjawisk zachodzących wokół krawędzi uginającej (omówionych w rozdz.6.4.1), rozpatruje się dwa jakościowo różne przypadki interakcji promienia dźwiękowego z krawędzią uginającą:

- promień dźwiękowy ulega ugięciu do obszaru cienia akustycznego krawędzi pojedynczej K (rys.6.3a) lub krawędzi podwójnej (K_1-K_2) (rys. 6.3b),

- promień dźwiękowy odbija się w pobliżu krawędzi K (rys.6.3c) lub przechodzi w pobliżu krawędzi K, lecz poza obszarem cienia akustycznego (rys.6.3d).

W sytuacji pierwszej, składowa dyfrakcyjna występująca w obszarze cienia akustycznego jest nośnikiem energii akustycznej. W związku z tym



Rys. 6.3. Możliwe przypadki interakcji promienia dźwiękowego i krawędzi K: a) ugięcie na krawędzi pojedynczej, b) na krawędzi podwójnej, c) odbicie w pobliżu krawędzi K, d) przejście w pobliżu krawędzi K

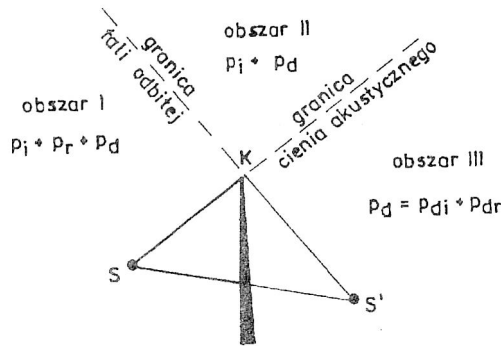
Fig. 6.3. Possible cases of interaction of sound ray and edges K: a) diffraction by a single edge, b) by a double edge, c) reflection near the edge K, d) transition near the edge K

traktowana jest jak niezależna fala, która podlega prawom propagacji analogicznie do fali geometrycznej, tzn. może ulec ponownemu odbiciu lub ugięciu. W modelu numerycznym składowa ta jest reprezentowana przez promień dźwiękowy, a zjawisko dyfrakcji opisują modele ugięcia na krawędzi pojedynczej oraz podwójnej, które omówiono szczegółowo w rozdz. (6.4.2) i (6.4.3). W sytuacji drugiej, składowe dyfrakcyjne, które występują w obszarze fali bezpośredniej i odbitej są uwzględnione w modelu w formie odpowiednich poprawek dyfrakcyjnych (patrz rozdz. 6.4.4). Reprezentują one rozpraszający wpływ krawędzi. Uwzględnienie poprawek dyfrakcyjnych daje w rezultacie ciągły rozkład przewidywanego ciśnienia akustycznego wokół krawędzi.

6.4.1. Matematyczny model pola akustycznego wokół krawędzi

Interpretacja fizyczna zjawiska dyfrakcji

W geometryczno-optycznej teorii dyfrakcji zakłada się, że ruch falowy można rozłożyć na falę geometryczno-optyczną oraz falę ugięcia.



Rys. 6.4. Pole akustyczne wokół krawędzi uginającej - podział na 3 strefy
Fig. 6.4. Acoustic field around the diffracting edge - division into three regions

Zgodnie z tym obszar wokół krawędzi można podzielić na trzy strefy (patrz rys.6.4), przy czym granice obszarów fali bezpośredniej (p_i) oraz fali odbitej (p_r) wynikają z praw optyki geometrycznej. Składowa dyfrakcyjna (p_d) występuje w całym obszarze wokół krawędzi uginającej, przy czym jest ona sumą składowej dyfrakcyjnej (p_{di}), która związana jest ze źródłem rzeczywistym S oraz (p_{dr}) związanej ze źródłem pozornym S' [24][85]. Fala bezpośrednia przechodząca w pobliżu krawędzi ulega częściowemu ugięciu i rozchodzi się w obszarze cienia akustycznego (obszar III - rys.6.4) w postaci fali dyfrakcyjnej (p_{di}). Równocześnie ulega zmniejszeniu energia fali bezpośredniej p_i rozchodzącej się w obszarze I i II, co reprezentowane jest przez składową (p_{di}) o ujemnej amplitudzie. Podobne zjawisko zachodzi, gdy fala akustyczna ulega odbiciu w pobliżu krawędzi uginającej. Ze względu na skończony wymiar płaszczyzny odbijającej tylko część energii zostanie odbita zgodnie z prawem optyki geometrycznej, część natomiast zostanie ugięta i będzie rozchodzić się w obszarze II i III w postaci składowej dyfrakcyjnej (p_{dr}). W obszarze I składowa p_{dr} o ujemnej amplitudzie reprezentuje spadek energii fali odbitej.

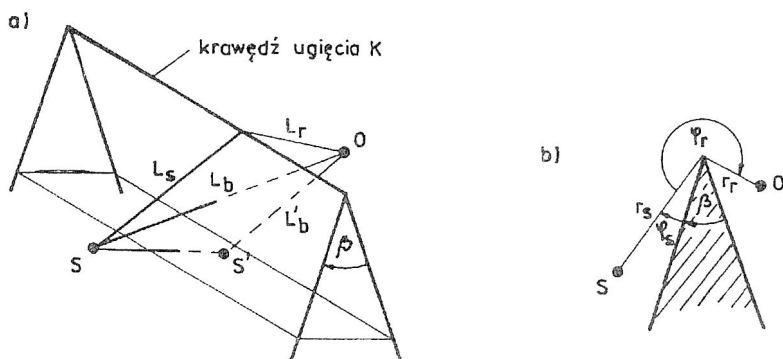
Model matematyczny pola akustycznego wokół krawędzi

Zgodnie z założeniami geometrycznej teorii dyfrakcji, ciśnienie akustyczne p_t w dowolnym punkcie pola akustycznego wokół krawędzi uginającej opisuje zależność (6.10) [24][122][139].

$$p_t = \eta(\pi + \phi_S - \phi_r) p_i + \eta(\pi - \phi_S - \phi_r) p_r + p_d, \quad (6.13)$$

gdzie:

$$\eta(\tau) = \begin{cases} 1 & \Rightarrow \tau \leq 0, \\ 0 & \Rightarrow \tau > 0. \end{cases}$$



Rys. 6.5. Geometria układu: źródło S - krawędź K - punkt obserwacji O;
 a) widok, b) parametry układu w przekroju prostokątnym
 Fig. 6.5. Configuration: of sound source S - edge K - receiver O;
 a) view, b) geometrical parameters in normal section

We wzorze tym p_i , p_r i p_d oznaczają odpowiednio ciśnienie fali bezpośredniej, odbitej i dyfrakcyjnej.

Jeżeli pominiemy czynnik $\exp(i\omega t)$ oraz uwzględnimy geometrię układu: źródło dźwięku (S) - krawędź uginająca (K) - punkt obserwacji, jak na rys.6.5, wtedy składowe pola akustycznego wynoszą:

a) składowa bezpośrednia

$$p_i = \frac{\exp(ikl_b)}{kl_b}, \quad (6.14)$$

gdzie:

l_b - bezpośrednia odległość: źródło S - punktem obserwacji O (rys.6.5);

b) składowa odbita

p_r - wg wzoru (6.5),

w którym zamiast r' podstawiamy l'_b (rys.6.5);

c) składowa dyfrakcyjna

$$p_d = \frac{\exp(ikl_d)}{kl_d} \left\{ \exp(-i\pi/4\sqrt{\pi}) \times \right. \quad (6.15)$$

$$\left. \times (\operatorname{sgn}(\pi + \phi_s - \phi_r) \exp(-ix_-^2) F(X_-) + \operatorname{sgn}(\pi - \phi_s - \phi_r) R_p \exp(-ix_+^2) F(X_+)) \right\},$$

gdzie:

$$X_{\pm} = \left\{ \frac{k r_s r_r}{\pi l_d} \right\}^{1/2} \frac{\cos(\pi/\nu) - \cos((\phi_r \pm \phi_s)/\nu)}{1/\nu \sin(\pi/\nu)}, \quad (6.16)$$

$$\operatorname{sgn}(\tau) = \begin{cases} -1 & \Rightarrow \tau \leq 0, \\ 1 & \Rightarrow \tau > 0. \end{cases}$$

$$F(X) = \int_x^\infty e^{iu^2} du \quad - \text{całka Fresnela},$$

przy czym (rys.6.5):

- l_d - odległość dyfrakcyjna, tzn. najkrótsza droga od źródła S przez krawędź uginającą K do odbiornika R,
- r_s - prostopadła odległość w układzie źródło S - krawędź K,
- r_r - prostopadła odległość w układzie odbiornik O - krawędź K,
- ϕ_s, ϕ_r - kąty określające odpowiednio położenie źródła i odbiornika względem płaszczyzn tworzących krawędź.

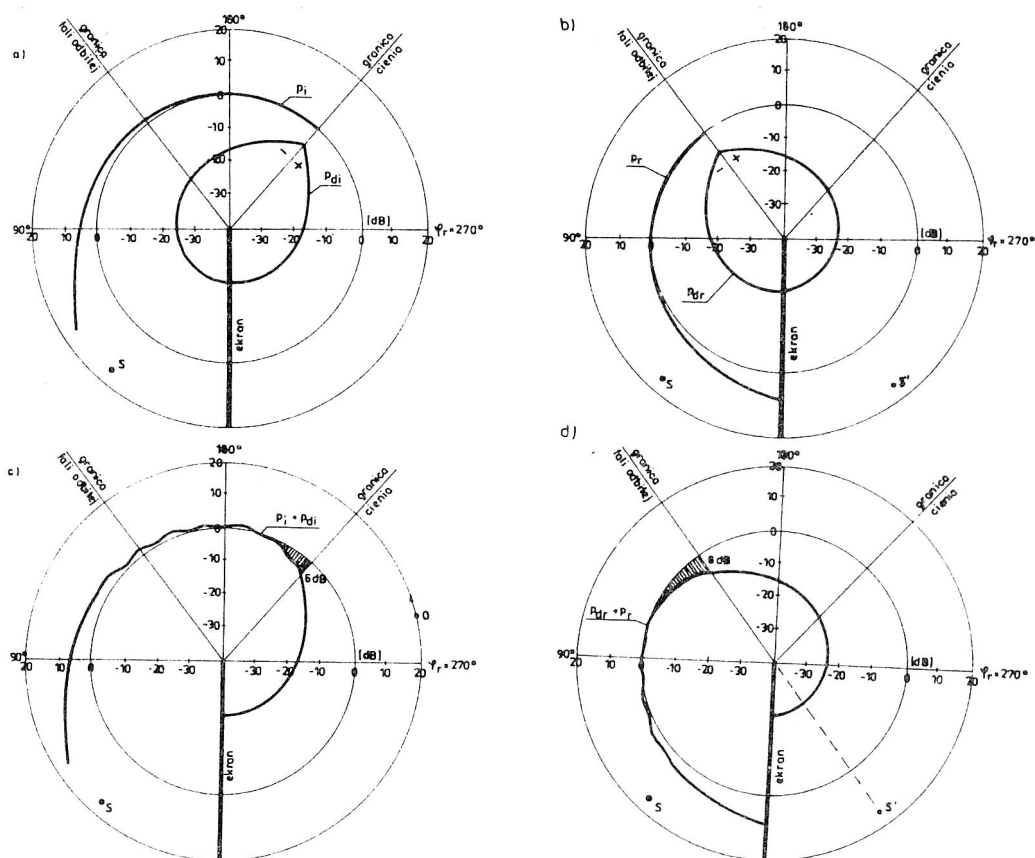
Zależność (6.15) jest rozwiązaniem Pierce'a [24][72][139], które zmodyfikowano zgodnie z przyjętymi w rozdz.6.2. założeniami. Obowiązuje ono w całym obszarze wokół krawędzi uginającej, dla położenia źródła S i odbiornika O spełniających warunki $kr_r \gg 1$ oraz $kr_s \gg 1$. W przypadku gdy $\beta = 0$ przeszkoda przyjmuje postać ekranu cienkiego, a gdy $\beta = \pi/2$ narożnika. Składnik pierwszy drugiego czynnika w (6.15) opisuje falę dyfrakcyjną związaną ze źródłem rzeczywistym S, czyli ciśnienie p_{di} fali dyfrakcyjnej związanej z falą bezpośrednią, natomiast składnik drugi falę dyfrakcyjną źródła pozornego S', czyli ciśnienie p_{dr} składowej dyfrakcyjnej związanej z falą odbitą.

Z przeprowadzonej w [74] i [139] analizy rozkładu pola akustycznego wokół pojedynczej krawędzi uginającej (przykładowe wyniki przedstawiono na rys.6.6 i 6.7) wynikają istotne dla dalszych rozważań wnioski.

1. Fala dyfrakcyjna niesie tylko niewielką część energii fali padającej, przy czym w miarę oddalania się od granicy cienia akustycznego amplituda fali dyfrakcyjnej szybko maleje. Dla kątów ugięcia większych od 20° moduł transmitancji fali dyfrakcyjnej przyjmuje wartości mniejsze o więcej niż 10 dB w stosunku do wartości na granicy cienia akustycznego (rys.6.6a,c i 6.7a,c).

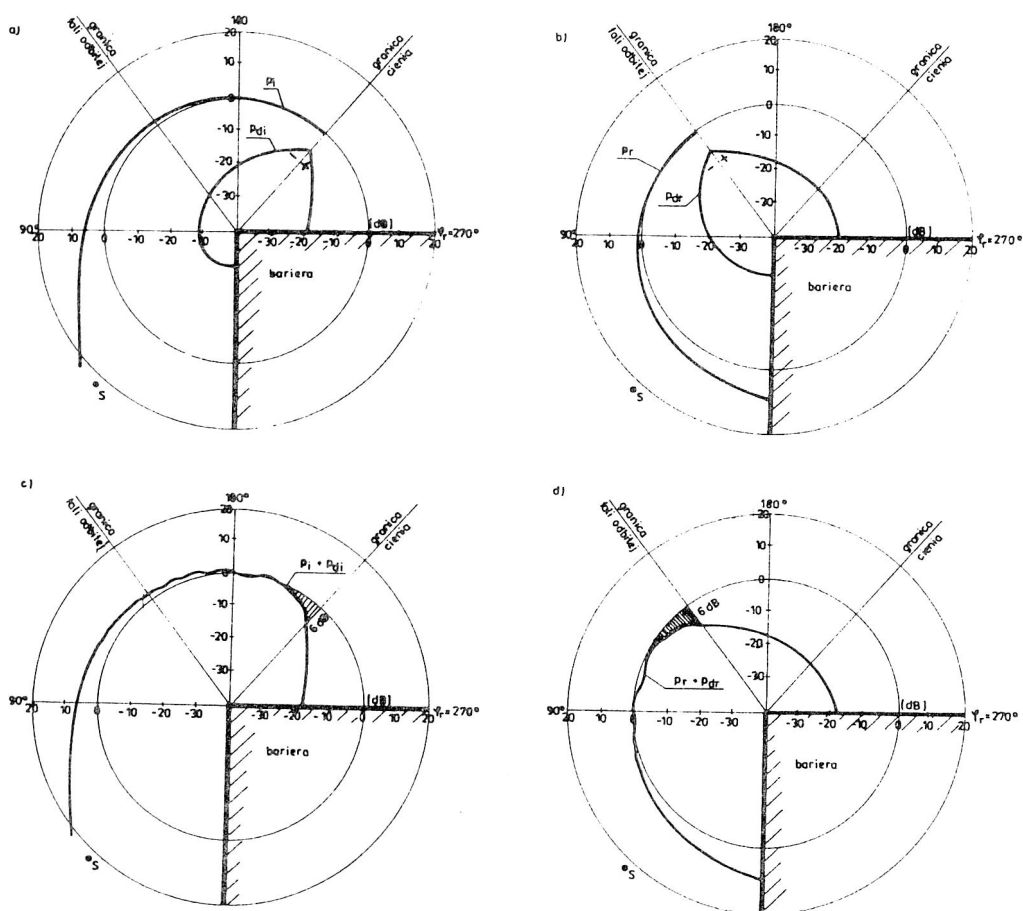
2. Występuje pełna symetria między zachowaniem źródła pozornego S' na granicy fali odbitej i źródła rzeczywistego na granicy cienia akustycznego (por. rys.6.6a i 6.6c).

3. Uwzględnienie występowania składowej dyfrakcyjnej w całym obszarze wokół krawędzi uginającej umożliwia zachowanie w modelu ciągłości ciśnienia akustycznego na granicy obszarów. W przeciwnym razie na granicy obszarów I i II oraz II i III występuje 6 dB skok ciśnienia akustycznego.



Rys. 6.6. Rozkład modułu transmitancji $|T_p|$ wokół cienkiej krawędzi ($\beta=0^\circ$) w funkcji kąta ϕ_r dla stałego położenia źródła S ($\phi_s=40^\circ$, $r_s/\lambda=5$, $\lambda=0,68$ m) [74][139]: a) fala bezpośrednia (p_i) i związana z nią fala dyfrakcyjna (p_{di}), b) fala odbita (p_r) i związana z nią fala dyfrakcyjna (p_{dr}), c) i d) sumy odpowiednich składowych wyznaczone w pasmie tercjowym z uwzględnieniem interferencji

Fig. 6.6. Distribution of transmittance module $|T_p|$ around the thin edge ($\beta=0^\circ$) as a function of angle ϕ_r for constant position of source S ($\phi_s=40^\circ$, $r_s/\lambda=5$, $\lambda=0,68$ m) [74][139]: a) direct wave (p_i) and corresponding diffracted wave (p_{di}), b) reflected wave (p_r) and corresponding diffracted wave (p_{dr}), c) and d) sums of corresponding components determined in the one-third octave band taking into account interference phenomena



Rys. 6.7. Rozkład modułu transmitancji $|T_p|$ wokół narożnika ($\beta=90^\circ$) w funkcji kąta ϕ_r dla stałego położenia źródła S ($\phi_s=40^\circ$, $r_s/\lambda=5$, $\lambda=0,68$ m) [74][139]: a) fala bezpośrednia (p_i) i związana z nią fala dyfrakcyjna (p_{di}), b) fala odbita (p_r) i związana z nią fala dyfrakcyjna (p_{dr}), c), d) sumy odpowiednich składowych wyznaczone w pasmie tercjowym z uwzględnieniem interferencji

Fig. 6.7. Distribution of transmittance module $|T_p|$ around the wedge ($\beta=90^\circ$) as a function of angle ϕ_r for constant position of source S ($\phi_s=40^\circ$, $r_s/\lambda=5$, $\lambda=0,68$ m) [74][139]: a) direct wave (p_i) and corresponding diffracted wave (p_{di}), b) reflected wave (p_r) and corresponding diffracted wave (p_{dr}), c) and d) sums of corresponding components determined in the one-third octave band, taking into account interference phenomena

Dla punktów w odległości kątowej $\phi < 20^\circ$ od odpowiedniej granicy cienia akustycznego, ciśnienie fali bezpośredniej oraz odbitej szacowane jest z nadmiarem. Wielkość tego błędu ilustruje zakreskowany obszar na rys.6.6a i 6.6c.

6.4.2. Model ugięcia na krawędzi pojedynczej

W przypadku pojedynczego ugięcia na krawędzi ekranu cienkiego, gdy położenie rzeczywistego źródła dźwięku oraz odbiornika jest znane, transmitancję obiektową $T_O(K)$ można wyznaczyć bezpośrednio wychodząc z definicji transmitancji T_p trasy (def.6.1) (patrz wzory (6.5), (6.6) i (6.15)). Czynnikiem pierwszy w (6.15), który opisuje geometryczne rozprzestrzenianie się fali wzdłuż trasy o długości l_d , jest interpretowany jako transmitancja odległościowa T_d dla propagacji fali w ośrodku bezstratnym (por. wzór (6.4) dla $m = 0$). Drugi czynnik w (6.15) jest poszukiwaną transmitancją obiektową ugięcia $T_O(K)$. Porównując wzory (6.8) i (6.15), na zasadzie analogii do współczynnika odbicia, transmitancję obiektową $T_O(K)$ można interpretować jako współczynnik ugięcia.

Po zastąpieniu w rozwiązaniu (6.15) całki Fresnela $F(X)$ pomocniczymi funkcjami Fresnela $f(X)$ i $g(X)$ i założeniu⁵⁷ $R_p \approx 1$, uzyskuje się następujące zależności, które opisują transmitancję obiektową $T_O(K)$ dla pojedynczego ugięcia [62][122][123]:

$$T_O(K) = H'(X_-) + H'(X_+) , \quad (6.17)$$

$$H(X) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-i\pi}{4}\right) \left[g\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} X\right) + i f\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} X\right) \right] , \quad (6.17a)$$

$$H'(X) = \operatorname{sgn}(X) H(|X|) , \quad (6.17b)$$

gdzie:

X - parametr opisujący geometrię układu: źródło S - krawędź K - punkt obserwacji O , wg (6.16),

$g(u)$, $f(u)$ - pomocnicze funkcje Fresnela.

Pomocnicze funkcje Fresnela, dla zmiennej u , dane są zależnościami⁵⁸:

$$f(u) = \frac{1 + 0,926 u}{2 + 1,792 u + 3,104 u^2} + e(u) , \quad e(u) \leq 10^{-3} , \quad (6.18a)$$

$$g(u) = \frac{1}{2 + 4,142 u + 3,492 u^2 + 6,67 u^3} + e(u) , \quad e(u) \leq 10^{-3} . \quad (6.18b)$$

⁵⁷W modelu ugięcia zakłada się, że wpływ właściwości pochłaniających płaszczyzny związanej z krawędzią na pole wypadkowej fali dyfrakcyjnej w obszarze cienia akustycznego jest pomijalnie mały. Potwierdzają to wyniki przedstawione przez Isei w [67].

⁵⁸Abramowitz M., Stegun J.A., *Handbook of Mathematical Functions*, National Bureau of Standards, 1964.

6.4.3. Model ugięcia na krawędzi podwójnej

Do opisu ugięcia promienia dźwiękowego na krawędzi podwójnej przyjęto model ugięcia na barierze szerokiej oparty na rozwiązaniu podanym przez Pierce'a [122]. Model opisuje sytuację, gdy punkt obserwacji O znajduje się w cieniu akustycznym krawędzi K_2 , tworzącej krawędź podwójną K_1-K_2 (patrz rys.6.7). Dla punktów położonych w obszarze cienia akustycznego krawędzi K_1 przyjmuje się model ugięcia, jak dla krawędzi pojedynczej (rozdz.6.4.2).

Transmitancję obiektową $T_O(K_g)$ dla ugięcia na krawędzi podwójnej opisują zależności [122][139]:

$$T_O(K_g) = (f(Y_s) + ig(Y_s)) \times (f(BY_c) + ig(BY_c)) , \quad (6.19)$$

$$Y_s = Y_S \max Y_R ; \quad Y_c = Y_S \min Y_R ,$$

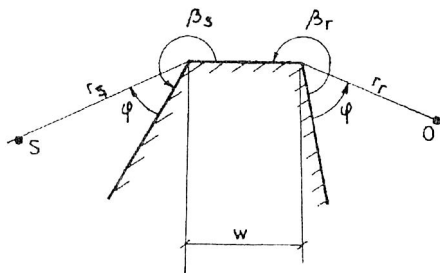
$$Y_S = \frac{2 r_S (w + r_S)^{1/2}}{\lambda l_d} \frac{\cos(\nu_S) - \cos(\nu_S(\beta_S - \phi_S))}{\nu_S \sin(\nu_S \pi)} , \quad (6.20a)$$

$$Y_R = \frac{2 r_R (w + r_S)^{1/2}}{\lambda l_d} \frac{\cos(\nu_R) - \cos(\nu_R(\beta_R - \phi_R))}{\nu_S \sin(\nu_S \pi)} , \quad (6.20b)$$

$$\nu_S = \beta_S / \pi ; \quad \nu_R = \beta_R / \pi ,$$

$$B = \frac{w (w + r_S + r_R)}{(w + r_S) (w + r_R)} ,$$

pozostałe oznaczenia jak na rys.6.8.



Rys. 6.8. Geometria oraz parametry modelu ugięcia na barierze grubej

Fig. 6.8. Geometry and parameters for model of diffraction by wide barrier

6.4.4. Poprawki dyfrakcyjne

Na podstawie założeń przyjętych w rozdz.6.2.2, poprawki dyfrakcyjne uwzględniają rozpraszający wpływ krawędzi uginającej jeżeli nie jest ona

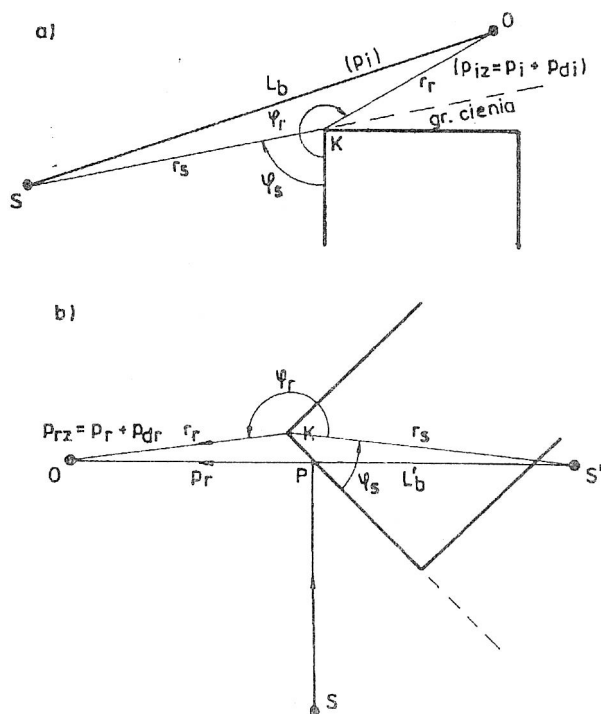
obiektem rozpatrywanej trasy promienia dźwiękowego. Jak wynika z analizy przeprowadzonej w rozdz.6.4.1. należy tu rozważyć dwa przypadki:

- promień dźwiękowy przechodzi w pobliżu⁵⁹ krawędzi K (rys.6.9a),
- promień dźwiękowy odbija się w pobliżu krawędzi K (rys.6.9b).

Rozważmy przypadek pierwszy. Jeżeli przez p_i oznaczymy ciśnienie fali bezpośredniej w polu swobodnym, a przez p_{iz} ciśnienie występujące w tym samym punkcie przestrzeni w obecności krawędzi, to na podstawie wzorów (6.13) i (6.14) zachodzi zależność

$$p_{iz} = p_i (1 - p_d/p_i). \quad (6.21)$$

Jeżeli założymy, że w tym przypadku możemy pominąć wpływ składowej dyfrakcyjnej związanej z falą odbitą (rozdz.6.4.1)



Rys. 6.9. Geometria do wyznaczania poprawek dyfrakcyjnych: promień dźwiękowy przechodzi (a) lub ulega odbiciu (b) w pobliżu krawędzi K

Fig. 6.9. Geometry for determining diffraction corrections: the sound ray passes (a) or reflected (b) near the edge K

⁵⁹Z analizy rozkładu składowych pola akustycznego wokół krawędzi uginającej wynika, że rozpraszający wpływ krawędzi ma istotne znaczenie tylko dla punktów obserwacji, dla których odległość kątowa ϕ , od granicy cienia akustycznego dla fali bezpośredniej lub odbitej nie przekracza 20° (patrz rys.6.6c,d).

$$P_d = P_{di},$$

wtedy na podstawie wzorów (6.5), (6.6), (6.15) i (6.17) transmitancja obiektowa T_{oci} poprawki dyfrakcyjnej związanej z falą bezpośrednią wynosi

$$T_{oci} = (1 - H'(X_-)), \quad (6.22)$$

gdzie: $H'(X_-)$ wg zależności (6.17).

Rozważmy w podobny sposób przypadek drugi. Jeżeli przez p_r oznaczymy ciśnienie fali odbitej od nieskończonej płaszczyzny, a przez p_{rz} ciśnienie w tym samym punkcie przestrzeni, gdy odbicie następuje w pobliżu krawędzi, wówczas zachodzi zależność

$$p_{rz} = p_r (1 - p_d/p_r). \quad (6.23)$$

Pominąwszy w tym przypadku wpływ składowej dyfrakcyjnej związanej z falą bezpośrednią (rozdz.6.4.1) i podstawiając

$$P_d = P_{dr},$$

na podstawie wzorów (6.5), (6.6), (6.15) i (6.17) otrzymujemy następującą zależność na transmitancję obiektową T_{ocr} poprawki dyfrakcyjnej związanej z falą odbitą:

$$T_{ocr} = (1 - H'(X_+)), \quad (6.24)$$

gdzie: $H'(X_+)$ wg zależności (6.17).

6.4.5. Model ugięcia wielokrotnego

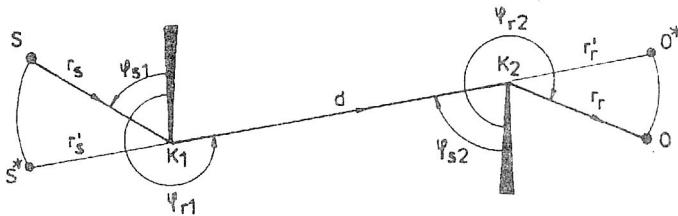
Transmitancja obiektowa ugięcia jest funkcją wzajemnego położenia źródła, krawędzi uginającej oraz punktu obserwacji (patrz (6.15-6.20)). Parametrami opisującymi geometrię takiego układu są parametry X_- i X_+ (wg wzorów (6.16)) dla krawędzi pojedynczej oraz parametry Y_s i Y_r (wg wzorów (6.20)) dla krawędzi podwójnej. W przypadku wielokrotnego odbicia i ugięcia promienia dźwiękowego, gdy rozpatrywana krawędź jest n-tym elementem trasy, powstaje problem określenia położenia źródła S oraz punktu obserwacji O, tak aby można było wyznaczyć odpowiednią wartość parametru X lub Y. W niniejszej pracy, do rozwiązania tego problemu wykorzystano metodę pomocniczych źródeł dźwięku S^* oraz pomocniczych punktów obserwacji O^* [122][85], którą powiązano z metodą obrazów pozornych [138][141]. Oparto się na pracach Pierce'a [122] i Kurzego [85], którzy stosowali metodę pomocniczych źródeł i punktów obserwacji do analizy zjawiska dyfrakcji na barierze grubej.

W celu wyjaśnienia zasady pomocniczych źródeł i odbiorników rozważmy najprostszy przypadek, gdy promień dźwiękowy (na drodze od źródła S do punktu O) ulega dwukrotnie odbiciu: na krawędzi K_1 i K_2 (rys.6.10). Zakładamy, że jeżeli odległość d między krawędziami spełnia warunek $kd \gg 1$, to transmitancja obiektowa $T_O(K_1)$ wprowadzana przez krawędź K_1 jest równoważna transmitancji obiektowej $T_{O^*}^*(K_1)$ wyznaczonej wg (6.17) dla parametrów geometrycznych układu: $S-K_1-O^*$. Transmitancja obiektowa $T_O(K_2)$ dla krawędzi K_2 jest równoważna transmitancji $T_O^*(K_2)$ wyznaczonej wg (6.17) dla parametrów układu: S^*-K_2-O . Stąd do wzoru (6.16) podstawia się następujące wartości parametrów geometrycznych (rys.6.10):

$$\text{dla } K_1: \quad r_s = r_s, \quad \phi_s = \phi_{s1} \quad \text{oraz} \quad r_r = d + r_r', \quad \phi_r = \phi_{r1}$$

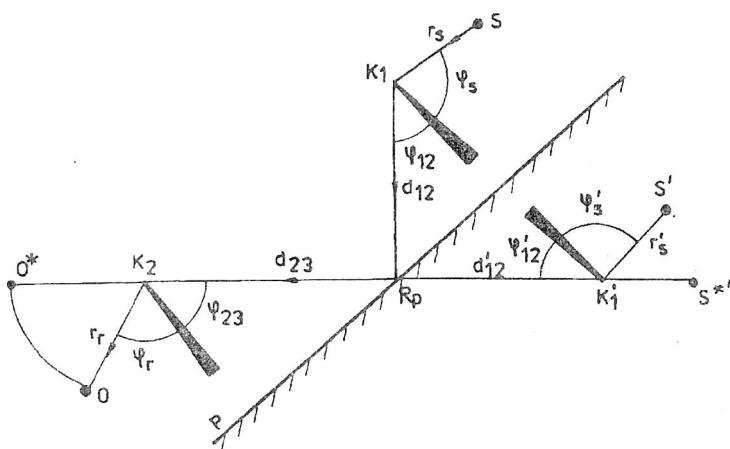
$$\text{dla } K_2: \quad r_s = d + r_s', \quad \phi_s = \phi_{s2} \quad \text{oraz} \quad r_r = r_r', \quad \phi_r = \phi_{r2}$$

Rozpatrzmy następnie przypadek dwu krawędzi uginających K_1 i K_2 rozdzielonych płaszczyzną odbijającą P , jak na rys.6.11. Fala dyfrakcyjna ugięta na krawędzi K_1 odbija się od płaszczyzny P , ponownie ugina się na krawędzi K_2 i dociera do punktu obserwacji O . Założywszy, że odbicie fali dyfrakcyjnej krawędzi K_1 od płaszczyzny P jest reprezentowane przez pozorną krawędź K_1' oraz pozorne źródło $S'(K_1')$, transmitancje obiektowe dla krawędzi K_1 oraz K_2 rozpatrujemy jak dla dwu kolejnych krawędzi uginających: pozornej krawędzi K_1' i rzeczywistej krawędzi K_2 oraz źródła pozornego S' .



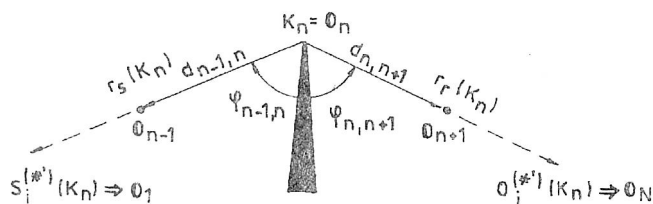
Rys. 6.10. Model ugięcia na dwóch kolejnych, niezależnych krawędziach K_1 i K_2 - zasada wyznaczania tras promieni dźwiękowych oraz parametrów geometrycznych dla pomocniczego źródła S^* i pomocniczego odbiornika O^*

Fig. 6.10. Model of diffraction on two successive, independent edges K_1 and K_2 - principle of determining sound ray path and geometric parameters for auxiliary source S^* and auxiliary receiver O^*



Rys. 6.11. Geometria dla dwóch krawędzi uginających K_1 i K_2 rozdzielonych płaszczyzną odbijającą P - zasada wyznaczania pozornego obrazu K_1' krawędzi K_1 ; S' - źródło pozorne, S^{**} - pomocnicze źródło pozorne

Fig. 6.11. Geometry for two diffracting edges K_1 and K_2 separated by the reflecting plane P - principle of determining the mirror image K_1' ; S' - image source, S^{**} - image auxiliary source



Rys. 6.12. Ogólna zasada wyznaczania parametrów geometrycznych dla krawędzi K_n będącej n -tym obiektem (O_n) trasy promienia dźwiękowego; źródło S - pierwszy obiekt (O_1), punkt obserwacji O - ostatni obiekt (O_N)

Fig. 6.12. General principle of determining geometric parameters for diffraction by edge K_n being n -th object (O_n) of the sound ray path; source S - first object (O_1), the observation point O - the last object (O_N)

Na podstawie analizy matematycznej modelu zjawiska dyfrakcji, przeprowadzonej podaną metodą dla szeregu możliwych przypadków kolejnego występowania różnych obiektów na trasie promienia dźwiękowego (płaszczyzn odbijających i krawędzi uginających), wykazano [138][141], że transmitancja obiektowa ugięcia $T_O(K)$ dla krawędzi stanowiącej n -ty element trasy, może być wyznaczona na podstawie parametrów określających położenia odcinków trasy mających wspólny punkt z tą krawędzią (kąty $\phi_S(K_n)$ oraz $\phi_R(K_n)$) oraz całkowitej długości tras po obu stronach krawędzi K_n (promienie $r_R(K_n)$ i $r_S(K_n)$) (patrz rys.6.12).

Transmitancja obiektowa ugięcia $T_O(K_n)$ dla krawędzi, która stanowi n -ty obiekt N -elementowej trasy, opisana jest wzorem (6.17) dla następujących parametrów występujących w zależności (6.16) (rys.6.12):

$$r_S(K_n) = \sum_{k=2}^n d_{k-1,k}; \quad r_R(K_n) = \sum_{k=n}^N d_{k,k+1}, \quad (6.25)$$

$$\phi_S(K_n) = \phi_{n-1,n}; \quad \phi_R(K_n) = 2\pi - \beta - \phi_{n,n+1}. \quad (6.26)$$

6.5. Transmitancja wypadkowa

Wypadkowe ciśnienie akustyczne pochodzące od i -tego źródła dźwięku rozpatrywane jest jako suma ciśnień akustycznych wywołanych falami dźwiękowymi docierającymi do punktu obserwacji wzdłuż wszystkich tras promieni dźwiękowych. Dla sygnałów sinusoidalnych, w wyniku zjawiska interferencji, może występować lokalne wzmocnienie lub osłabienie wypadkowego ciśnienia akustycznego w punktach, dla których różnica przesunięć fazowych $\Delta\varphi$ wynosi odpowiednio $\Delta\varphi = 2\pi n$ i $\Delta\varphi = \pi(2n-1)$, gdzie $n = 1, 2, \dots$. Dla sygnałów pasmowych, w wyniku przesunięć maksimów i minimów interferencyjnych dla poszczególnych częstotliwości, obserwujemy znacznie mniejszy efekt interferencji.

Z punktu widzenia zastosowania modelu propagacji fali do prognozowania klimatu akustycznego interesującym parametrem (charakteryzującym wypadkowe pole akustyczne) jest poziom ciśnienia akustycznego w tercjowym lub oktawowym pasmie częstotliwości. Istotne są zatem relacje energetyczne, które są opisane przez transmitancję energetyczną T_{ew} (6.3a). Algorytm wyznaczania transmitancji energetycznej $T_{ew}(2\Delta\omega)$ w pasmie częstotliwości, z uwzględnieniem zjawiska interferencji, zaproponował Jurkiewicz [73][84], wychodząc z przedstawionych poniżej założeń.

Na podstawie zależności (6.3a), korzystając z właściwości liczb zespolonych, transmitancję $T_{ew}(2\Delta\omega)$ uśrednioną w pasmie częstotliwości o szerokości $2\Delta\omega$ oraz pulsacji środkowej $\omega_0 = 2\pi f_0$, możemy zapisać wzorem

$$\mathbb{T}_{ew}(2\Delta\omega) = -\frac{1}{2\Delta\omega} \int_{\omega_0 - \Delta\omega}^{\omega_0 + \Delta\omega} \left(\sum_i \mathbb{T}_{pi}(\omega) \right) \left(\sum_i \mathbb{T}_{pi}(\omega) \right)^*, \quad (6.27)$$

w którym $()^*$ oznacza sprzężoną wartość zespoloną.

Założywszy równomierny rozkład gęstości energii akustycznej w pasmie częstotliwości o szerokości $2\Delta\omega$ oraz po uwzględnieniu we wzorze (6.7) nierówności $\sum \psi_n(\omega) \ll 2\pi f d_i / c$, transmitancję $\mathbb{T}_{pi}(\omega)$ i-tej trasy dla pasma $2\Delta\omega$ możemy aproksymować zależnością

$$\mathbb{T}_{pi}(\omega) = |\mathbb{T}_{pi}(\omega_0)| \exp(j(\Psi_i(\omega_0) + \frac{\omega d_i}{c})), \quad (6.28)$$

gdzie:

- $|\mathbb{T}_{pi}(\omega_0)|$ - moduł transmitancji i-tej trasy dla częstotliwości f_0 ,
- $\Psi_i(\omega_0)$ - przesunięcie fazowe wprowadzane w wyniku interakcji promienia dźwiękowego z obiektami przestrzeni (patrz wzór (6.7)), przy czym:

$$\Psi_i(\omega_0) = \sum \psi_n(\omega_0),$$

- d_i - całkowita długość i-tej trasy promienia dźwiękowego,
- c - prędkość dźwięku.

Po podstawieniu wzoru (6.28) do (6.27) otrzymujemy następującą zależność na wartość skuteczną transmitancji $\mathbb{T}_{ew}$ przestrzeni [59]:

$$\mathbb{T}_{ew} = \sum_i |\mathbb{T}_{pi}(\omega_0)|^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{i-1} \mathbb{T}_{pi}(\omega_0) \mathbb{T}_{pk}(\omega_0) r_t r_\omega, \quad (6.29)$$

gdzie:

- N - liczba tras promieni dźwiękowych między źródłem S i punktem O ,
- r_t - funkcja korelacji czasowej, wg (6.30),
- r_ω - funkcję uśredniania częstotliwościowego w pasmie $2\Delta\omega$, wg (6.31).

Ponadto mamy

$$r_t = 2 \operatorname{Re} \left(\exp(j(\varphi_i(\omega_0) - \varphi_k(\omega_0))) \times \exp\left(\frac{j(d_i - d_k)\omega_0}{c}\right) \right), \quad (6.30)$$

$$r_\omega = \frac{\sin\left(\frac{\Delta\omega}{c} (d_i - d_k)\right)}{\frac{\Delta\omega}{c} (d_i - d_k)}, \quad (6.31)$$

gdzie:

φ_i i φ_k - fazy odpowiednio $\mathbb{T}_{pi}$ i $\mathbb{T}_{pk}$,

d_i i d_k - długości i-tej i k-tej trasy promienia dźwiękowego.

6.6. Uwagi końcowe

Wprowadzenie pojęcia transmitancji pozwoliło na sformułowanie spójnego opisu analitycznego modelowanych zjawisk elementarnych oraz wyznaczenie wypadkowego pola akustycznego z uwzględnieniem efektu interferencji. Przez wprowadzenie pojęcia transmitancji obiektowej oraz rozważenie szeregu możliwych przypadków występowania krawędzi uginających oraz płaszczyzn odbijających wzdłuż trasy promienia dźwiękowego wykazano, że w modelu geometrycznym, opartym na metodzie obrazów pozornych, zjawisko ugięcia można rozpatrywać w analogiczny sposób do zjawiska odbicia. Podano także analityczny opis transmitancji ugięcia na krawędzi będącej n-tym obiektem trasy. Uwzględnienie (przez wprowadzenie tzw. poprawek dyfrakcyjnych) rozpraszającego wpływu krawędzi, gdy promień dźwiękowy przechodzi lub odbija się w jej pobliżu, pozwoliło na uzyskanie ciągłości rozkładu ciśnienia akustycznego w modelu pola akustycznego.

7. ZASTOSOWANIE GEOMETRYCZNEGO MODELU PROPAGACJI FAŁ AKUSTYCZNYCH DO PROGNOZOWANIA KLIMATU AKUSTYCZNEGO ŚRODOWISKA ZURBANIZOWANEGO

7.1. Wstęp

W niniejszym rozdziale przedstawiono sposób zastosowania geometrycznego modelu propagacji fali akustycznej w trójwymiarowej przestrzeni ograniczonej (patrz rozdz.6) do modelowania propagacji dźwięku w środowisku zurbanizowanym, zwanym dalej przestrzenią zurbanizowaną. W modelu tym uwzględniono wszystkie podstawowe zjawiska elementarne o charakterze deterministycznym, które decydują o wypadkowym klimacie akustycznym, pomijając wpływ warunków meteorologicznych. (Jest to czynnik losowy.) Uwzględnienie w modelu wielokrotnego ugięcia fali na krawędziach bocznych budynków oraz odbicia od wszystkich fasad budynków ma istotne znaczenie w kompleksowej analizie przenikania dźwięku w głąb wnętrz urbanistycznych oraz ocenie ich jakości akustycznej⁶⁰. Potwierdzają to wyniki uzyskane w trakcie weryfikacji modelu oraz analizy porównawczej z innymi metodami modelowania.

W początkowym etapie pracy, mimo licznych wyników badań eksperymentalnych prezentowanych w literaturze [152][158][161][175], weryfikację modelu oparto na wynikach badań własnych, gdyż zapewniało to możliwość kontroli możliwie dużej liczby czynników, które są istotne dla dokładności odwzorowania rzeczywistości w modelu numerycznym (rozdz.7.4). W kolejnym etapie przeprowadzono weryfikację poprzez porównanie z wynikami badań eksperymentalnych oraz modelowych, uzyskanymi w innych ośrodkach, zwracając szczególną uwagę na odwzorowanie efektów związanych z dyfrakcją (rozdz.7.6).

7.2. Model propagacji hałasu w przestrzeni zurbanizowanej

7.2.1. Założenia

Założenia wyjściowe modelu są następujące:

1. Model opisuje propagację dźwięku emitowanego przez zbiór punktowych źródeł dźwięku umieszczonych w przestrzeni zurbanizowanej.

⁶⁰ Zagadnienie oceny jakości akustycznej wnętrz urbanistycznych na podstawie badań empirycznych oraz badań na modelach w skali omówione zostało szeroko przez Stawicką-Wałkowską w [175].

2. Przestrzeń zurbanizowana zdefiniowana jest w kategoriach geometrycznych jako zbiór brył, figur i punktów umieszczonych w półprzestrzeni ograniczonej płaszczyzną gruntu.

3. Poziom dźwięku w punkcie obserwacji jest superpozycją następujących zjawisk elementarnych:

- geometrycznego rozprzestrzeniania się dźwięku,
- odbicia od fasad budynków,
- ugięcia na krawędziach obiektów budowlanych,
- pochłaniania przez powierzchnię gruntu,
- pochłaniania w powietrzu.

4. W rozważaniach pomija się wpływ czynników związanych z warunkami atmosferycznymi, zakładając warunki neutralne⁶¹.

5. Parametrami wejściowymi modelu są:

- parametry opisujące geometrię przestrzeni zurbanizowanej (wymiały oraz położenie brył i figur),
- współrzędne $\{x, y, z\}$ źródeł dźwięku oraz punktów obserwacji,
- charakterystyki akustyczne ośrodka, powierzchni odbijających oraz źródeł dźwięku.

6. Parametrami wyjściowym modelu są:

- rozkład poziomów ciśnienia L_K w oktawowych pasmach częstotliwości,
- skorygowany poziom dźwięku L_A obliczany na podstawie rozkładu poziomów ciśnienia L_K .

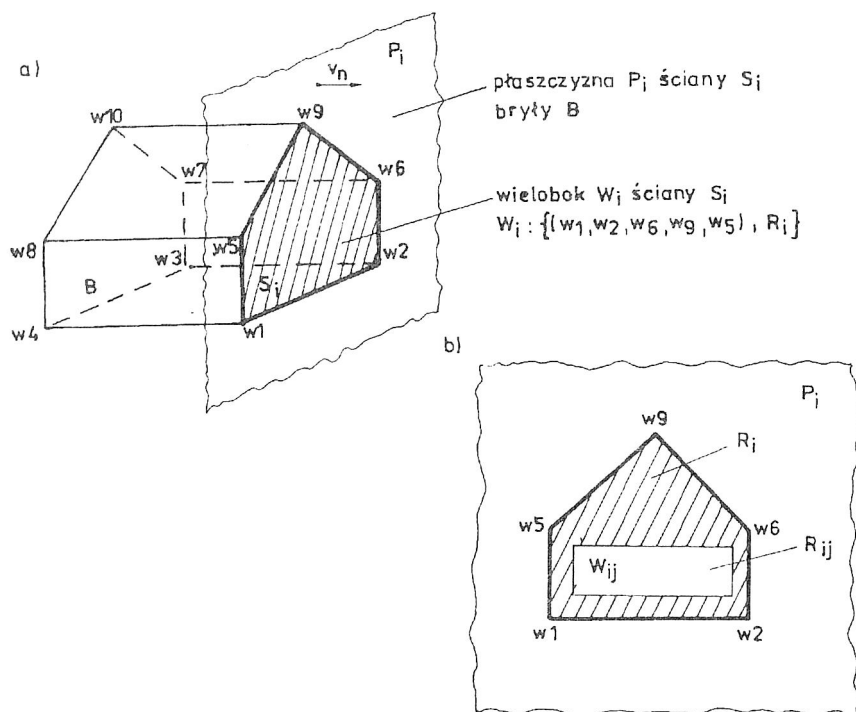
7.2.2. Ogólne związki między obiektami przestrzeni zurbanizowanej a obiektami przestrzeni ograniczonej

Przy rozpatrywaniu środowiska zurbanizowanego jako przestrzeni propagacji fali akustycznej, wyróżniono następujące jego elementy: budynki (obiekty budowlane) umieszczone na powierzchni gruntu, źródła hałasu (ZHS), obszary obserwacji (obszary chronione pod względem akustycznym), a także ekrany akustyczne, czyli specjalne konstrukcje dźwiękoizolacyjne. Uwzględniając założenia przyjęte w rozdz.6 i 7.2.1, dla sformułowania opisu przestrzeni zurbanizowanej w kategoriach geometrii analitycznej, przyjmuje się następujące założenia, które jednocześnie definiują obiekty przestrzeni zurbanizowanej:

Z7.1. Powierzchnia gruntu jest płaszczyzną odbijającą.

Z7.2. Każdy rzeczywisty obiekt budowlany (o wymiarach dużych w porównaniu z długością fali akustycznej) można zastąpić bryłą geometryczną (wklęsłą lub wypukłą).

⁶¹Brak wiatru, temperatura powietrza 10 ± 20 °C, wilgotność ~70%.



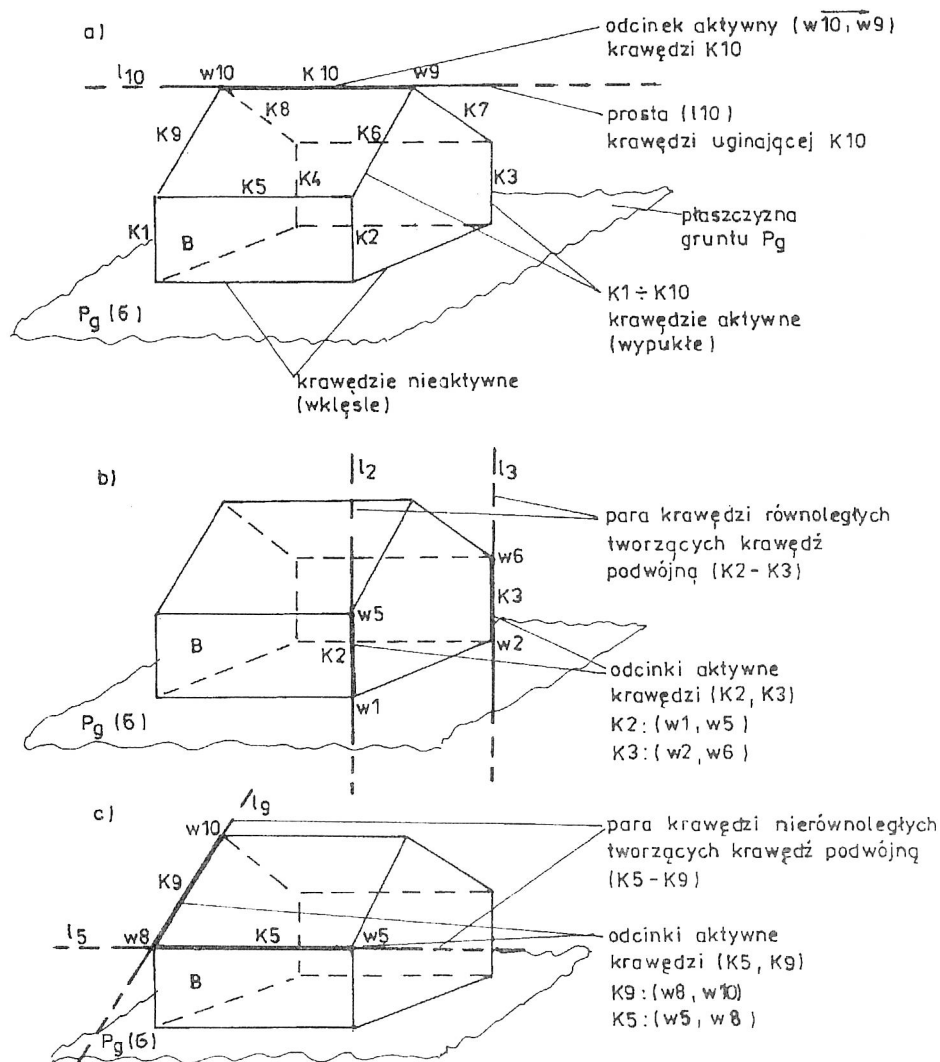
Rys. 7.1. Związek między obiektem przestrzeni zurbanizowanej a obiektami ograniczonej przestrzeni propagacji fali akustycznej: a) płaszczyzna P_i oraz wielobok W_i i-tej ściany bryły, b) wyróżniony fragment (wielobok W_{ij}) i-tej ściany o innych właściwościach akustycznych, v_n - wektor normalny do płaszczyzny P

Fig. 7.1. Relation between an urban space object and objects of bounded space of wave propagation: a) plane P_i and polygon W_i of i -th wall of solid, b) distinguished part (polygon W_{ij}) of i -th wall of different acoustic characteristics, v_n - normal vector to plane P

Z7.3. Ekran akustyczny jest obiektem o grubości w , małej w porównaniu z pozostałymi wymiarami geometrycznymi (długością i wysokością), i izolacyjności akustycznej R . W modelu przestrzeni ekran akustyczny jest reprezentowany przez figurę lub zbiór figur płaskich.

Z7.4. Obszar obserwacji reprezentowany jest przez zbiór punktów obserwacji $\{O_i\}$.

Z7.5. Obiekty przestrzeni geometrycznej zdefiniowane są jednoznacznie przez współrzędne $\{x, y, z\}$ wierzchołków odpowiednich brył, figur oraz punktów (patrz rys.7.1-7.3).



Rys. 7.2. Związek między obiektem przestrzeni zurbanizowanej a obiektami ograniczonej przestrzeni propagacji: pojedyncza krawędź uginająca K₁₀ (a), podwójna krawędź uginająca, utworzona przez parę krawędzi równoległych K₂ i K₃ (b) oraz przez parę krawędzi nierównoległych K₅ i K₉ (c)

Fig. 7.2. Relation between an urban space object and objects of bounded space of wave propagation: single diffracting edge K₁₀ (a), double diffracting edge, formed by a pair of parallel edges K₂ and K₃ (b) and by pair of edges not parallel K₅ and K₉ (c)

W celu przyporządkowania obiektom modelu przestrzeni zurbanizowanej odpowiednich obiektów ograniczonej przestrzeni propagacji fali akustycznej (patrz rozdz.6.1), przyjmuje się następujące założenia:

1. Bryły geometryczne⁶²

- wszystkie boki brył geometrycznych są niejednorodnymi, odbijającymi⁶³ płaszczyznami nieprzezroczystymi (patrz.6.2.1), skierowanymi stroną aktywną na zewnątrz bryły (rys.7.1),

- możliwe położenia punktów odbić od ściany ogranicza się do rzeczywistych wymiarów ściany bryły opisanych odpowiednim wielobokiem W (rys.7.1),

- każdemu wielobokowi W_i oraz jego wyróżnionym fragmentom W_{ij} , o innych właściwościach akustycznych, przypisuje się odpowiednie współczynniki odbicia R_i oraz R_{ij} (rys.7.1b),

- wszystkie swobodne wypukłe krawędzie bryły są pojedynczymi krawędziami uginającymi (patrz 6.2.1, pkt.2 oraz rys.7.2a),

- każda para krawędzi wypukłych, które należą do tego samego obiektu przestrzeni i związane są wspólnym wielobokiem ściany W , może tworzyć podwójną krawędź uginającą (patrz 6.2.1, p.2 oraz rys.7.2b i c),

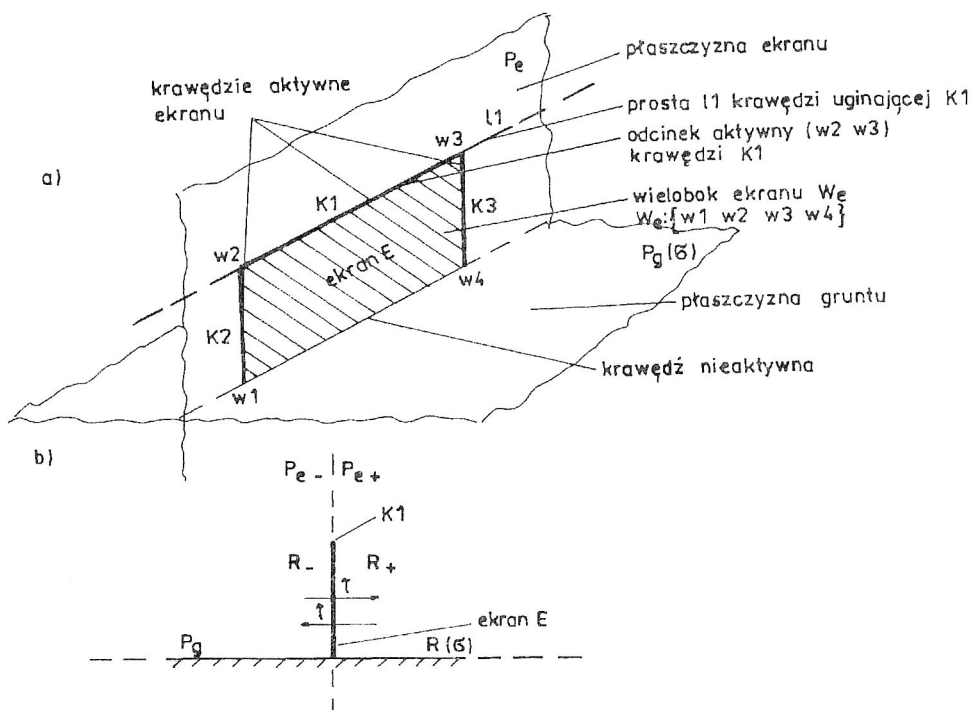
- maksymalna liczba kolejnych ugięć na krawędziach tego samego obiektu wynosi 2 (krawędź podwójna),

- każda krawędź uginająca (pojedyncza lub podwójna) jest niezależną, nieskończenie długą krawędzią uginającą, przy czym możliwe położenia punktów ugięcia ogranicza się do rzeczywistych wymiarów krawędzi⁶⁴, które są opisane odpowiednim odcinkiem $(\vec{w}_i, \vec{w}_j)$ (rys.7.2a),

⁶²W pewnych przypadkach budynki (bryły) mogą być źródłami hałasu, np. hale fabryczne, gdy hałas technologiczny emitowany jest do środowiska poprzez przeszklone ściany. Zagadnienie to rozważono w metodzie prognozowania zasięgu uciążliwości hałasów przemysłowych [189].

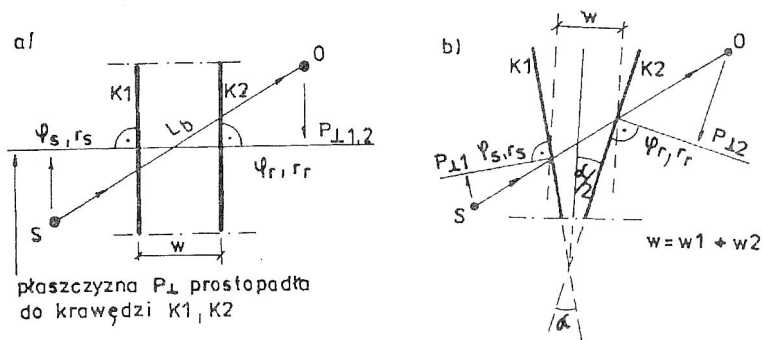
⁶³Jest to założenie upraszczające. W rzeczywistości fasady budynków (np. balkony, gzymsy itp.) mogą być powierzchniami częściowo rozpraszającymi. W ogólnym przypadku mogą wystąpić fale odbite w sposób zwierciadlany oraz fale rozproszone. Teoretyczną analizę tych zjawisk przedstawił Makarewicz w [105] i [106]. Wobec braku danych literaturowych dotyczących rozpraszających właściwości fasad budynków, a także wartości fizycznych współczynników odbicia dla typowych elewacji, przyjęcie modelu odbicia prostego jest uzasadnione. Założenia takie przyjmowali także Lyon [97] oraz Mohsen i inni [117].

⁶⁴W przypadku, gdy punkt ugięcia (Q) zbliża się do rzeczywistego końca krawędzi (np. narożnika budynku) przyjęte założenie może być przyczyną błędu modelu.



Rys. 7.3. Ekran akustyczny: a) opis geometryczny - płaszczyzna P_e ekranu oraz krawędzie aktywne K_1 , K_2 i K_3 , b) parametry akustyczne

Fig. 7.3. Acoustic screen: a) geometrical description - plane P_e of the screen and active edges K_1 , K_2 and K_3 , b) acoustic parameters



Rys. 7.4. Geometria dla modelu ugięcia na krawędzi podwójnej K_1K_2 : a) para krawędzi równoległych, b) para krawędzi nierównoległych
Fig. 7.4. Geometry of diffraction by double edge K_1K_2 : a) pair of parallel edges, b) pair of edges not parallel

- wszystkie krawędzie wklęsłe są krawędziami nieaktywnymi (rys.7.2a).

2. Ekran akustyczne

- ekran akustyczny jest płaszczyzną przezroczystą (w sensie definicji podanej w rozdz.6.2.1), która jest scharakteryzowana przez współczynniki odbicia R_+ i R_- obu stron oraz współczynnik transmisji τ lub izolacyjność akustyczną R (rys.7.3b),

- możliwe położenia punktów odbić ogranicza się do rzeczywistych wymiarów ekranu opisanych odpowiednim wielobokiem W_e (rys.7.3a),

- wszystkie swobodne krawędzie ekranu akustycznego są niezależnymi, pojedynczymi krawędziami uginającymi, zdefiniowanymi jak krawędzie pojedyncze brył.

3. Powierzchnia gruntu

- powierzchnia gruntu jest niejednorodną, płaszczyzną nieprzezroczystą, której właściwości akustyczne charakteryzuje zespolony współczynnik odbicia R_p , omówiony w rozdz.7.2.3,

- wyróżnionym obszarom powierzchni gruntu, które są opisane odpowiednimi wielobokami W ; przypisuje się różne wartości współczynnika odbicia R_p (patrz rozdz.7.2.3).

Z przyjętych powyżej założeń wynika, że krawędź podwójna może być utworzona przez parę krawędzi równoległych (rys.7.4a) lub nierównoległych (rys.7.4b). W pierwszym przypadku geometria rozpatrywanej krawędzi podwójnej odpowiada geometrii bariery grubej przyjętej przez Pierce'a w [157] (patrz także rozdz.6), co umożliwia bezpośrednie stosowanie wzorów (6.16) i (6.20). W przypadku drugim zachodzi konieczność ustalenia rozwiązania zastępczego. Zasadę przyjętego przybliżenia ilustruje rys.7.4b. W świetle badań Kurzego i Ringheima [85] przyjęcie układu zastępczego jest dopuszczalne. Z badań tych wynika, że dla bariery o wysokości $h_e > 3$ m i odległości źródła dźwięku i punktu obserwacji od bariery większych niż 20 m, wpływ kształtu przeszkody jest pomijalny.

Ograniczenie liczby kolejnych ugięć na krawędziach tego samego obiektu, wynika z braku matematycznego opisu tego zjawiska (patrz rozdz.6.1). Uwzględniając jednak, że minimalne tłumienie fali dyfrakcyjnej występujące na granicy cienia akustycznego, wynosi 3dB i szybko rośnie wraz ze wzrostem odległości kątowej ϕ_r od granicy cienia (rozd. 6.4.1), założenie to nie jest krytyczne.

7.2.3. Parametry modelu odbicia od powierzchni gruntu

Zastosowanie geometrycznego modelu propagacji dźwięku do środowiska zewnętrznego wymaga uwzględnienia faktu, że propagacja fali akustycznej odbywa się nad powierzchnią gruntu, której właściwości akustyczne są różne niż materiałów budowlanych stosowanych na fasady budynków.

W dalszej części przedstawiono w skrócie stan badań teoretycznych oraz eksperymentalnych dotyczących zjawiska odbicia fali dźwiękowej od powierzchni gruntu. Prezentacja ta jednocześnie uzasadnia dokonany wybór. Ze względu na stosunkowo rzadkie cytowanie w literaturze krajowej, przytoczono także podstawowe zależności opisujące parametry akustyczne powierzchni gruntu, z których skorzystano przy formułowaniu modelu propagacji dźwięku w przestrzeni zurbanizowanej.

Zagadnieniem teoretycznego opisu pola akustycznego punktowego źródła dźwięku nad powierzchnią gruntu⁶⁵, zajmowali się między innymi Attenborough [2] [5], Chien i Soroka [16][17], Donato [29], Filippi i Habault [37], Filippi [38], Thomasson [179], Wenzel [184]. W pracach tych wykazano, że dla powierzchni gruntu współczynnik odbicia dla fali kulistej Q i fali płaskiej R_p opisane są innymi zależnościami (por. (7.1) i (7.2)), przy czym istotne różnice między wartościami tych współczynników występują dla bardzo małych kątów padania fali ($\phi \leq 5$) [2][3][15][16][17][29][32][53]. Sugerowałoby to przyjęcie współczynnika odbicia Q do opisu właściwości pochłaniających powierzchni gruntu w modelu propagacji dźwięku w przestrzeni zurbanizowanej. Uwzględniwszy jednak założenia przyjęte w rozdz.6.1⁶⁶, a także opierając się na wynikach badań przedstawionych w [3][5][53] i przeprowadzonej analizie błędu, przyjęto rozwiązanie przybliżone, zastępując współczynnik odbicia Q , opisany wzorem (7.1), przez współczynnik odbicia R_p dany zależnością

⁶⁵Badania eksperymentalne zmierzające do określenia dodatkowego tłumienia dźwięku rozchodzącego się nad powierzchnią gruntu w funkcji odległości od źródła oraz właściwości gruntu, prowadzone były w wielu ośrodkach, zwłaszcza w odniesieniu do propagacji dźwięku hałasu drogowego nad powierzchnią pokrytą trawą [1][6][15][18][38][124][157]. W Polsce m.in. w ITB [161] i IOŚ [79] a także w KA UAM [106] i IPPT PAN w Warszawie. W niniejszej pracy, ze względu na przyjęty sposób modelowania propagacji dźwięku, wyniki tych badań nie znajdują bezpośredniego zastosowania.

⁶⁶W rozważanym modelu powierzchnia gruntu jest jedną z wielu nieprzezroczystych płaszczyzn odbijających.

(7.2). Ogranicza to wprowadzenie zakresu stosowania modelu, lecz upraszcza w zasadniczy sposób jego realizację numeryczną⁶⁷.

Współczynnik odbicia R_p jest funkcją zespolonej impedancji powierzchni Z , której charakterystyka zależy z kolei od struktury warstwy przypowierzchniowej gruntu. W rzeczywistości struktura tej warstwy charakteryzuje się dużą różnorodnością i niejednorodnością, nawet dla tego samego typu powierzchni, np. porośniętej trawą. W zależności od założonego modelu struktury powierzchni gruntu, np. struktura jednorodna, warstwowa, wielowarstwowa, oraz liczby uwzględnionych parametrów charakteryzujących właściwości fizyczne struktury, takich jak oporność przepływu, porowatość, itp., uzyskuje się różne zależności opisujące impedancję gruntu Z , zwane dalej modelami impedancji. Przedstawione przez Attenborougha [2][5] wyniki analizy teoretyczno-eksperymentalnej skłaniają do wniosku, że w praktycznych sytuacjach, gdy nie jest znana struktura powierzchni gruntu lub struktura ta zmienia się pomiędzy źródłem i obserwatorem, nie ma jednoznacznych kryteriów wskazujących na przewagę któregoś z modeli impedancji. W prognozowaniu hałasu w układach urbanistycznych zachodzi na ogół ta ostatnia sytuacja, stąd uzasadnione jest przyjęcie najprostszego modelu impedancji gruntu podanego przez Bazley'a i Delany'ego [16], chociaż jak wykazano w [5] w poszczególnych przypadkach może on dawać złą zgodność z wynikami pomiaru.

Współczynnik odbicia od powierzchni gruntu

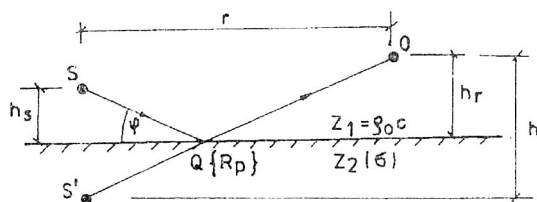
Dla powierzchni odbijającej, gdy zachodzi relacja $\rho_0 c / Z \ll 1$, w której $\rho_0 c$ oznacza impedancję właściwą powietrza, a Z impedancję powierzchni gruntu, oraz gdy spełnione są warunki $h/r \ll 1$ i $kh^2/r \ll 1$ (rys.7.5), (tzn., że zarówno źródło jak i odbiornik są stosunkowo blisko powierzchni gruntu), do celów obliczeniowych można stosować następującą przybliżoną zależność na współczynnik odbicia Q dla fali kulistej:

$$Q = R_p + (1 - R_p) F(w) , \quad (7.1)$$

gdzie:

R_p - współczynnik odbicia dla fali płaskiej, wg (7.2a lub 7.2b),
 $F(w)$ - brzegowy współczynnik strat (*boundary loss factor*), wg. (7.3).

⁶⁷Współczynnik odbicia dla fali płaskiej R_p jest funkcją oporności przepływu i kąta padania, natomiast wartość współczynnika odbicia dla fali kulistej zależy także od odległości: źródło dźwięku - punkt obserwacji. Przyjęcie R_p zamiast Q pozwala na jednakowe traktowanie w modelu numerycznym wszystkich powierzchni odbijających.



Rys. 7.5. Geometria dla modelu odbicia od powierzchni gruntu
Fig. 7.5. Geometry for reflection from the ground surface

Wkład drugiego składnika w wyrażeniu (7.1) jest rodzajem korekcji uwzględniającej fakt padania na powierzchnię gruntu fali kulistej, a nie płaskiej. Udział ten nazwano falą przygruntową (przyziemną), analogicznie jak dla fal radiowych⁶⁸. Fala ta jest istotnym składnikiem pola akustycznego w pobliżu powierzchni gruntu (gdy kąt padania $\phi \rightarrow 0$ (rys.7.5)), lecz amplituda jej maleje szybko (eksponencjalnie) wraz z wysokością nad powierzchnią gruntu.

Współczynnik odbicia dla fali płaskiej od powierzchni gruntu o zespolonej impedancji Z wynosi [5][18][53]

$$R_p = \frac{\sin\phi - \rho_0 c / Z (1 - k_0^2 / k^2 \cos^2\phi)^{1/2}}{\sin\phi + \rho_0 c / Z (1 - k_0^2 / k^2 \cos^2\phi)^{1/2}}, \quad (7.2a)$$

gdzie

k_0, k - stała falowa odpowiednio w powietrzu i gruncie,

$\rho_0 c$ - impedancja powietrza,

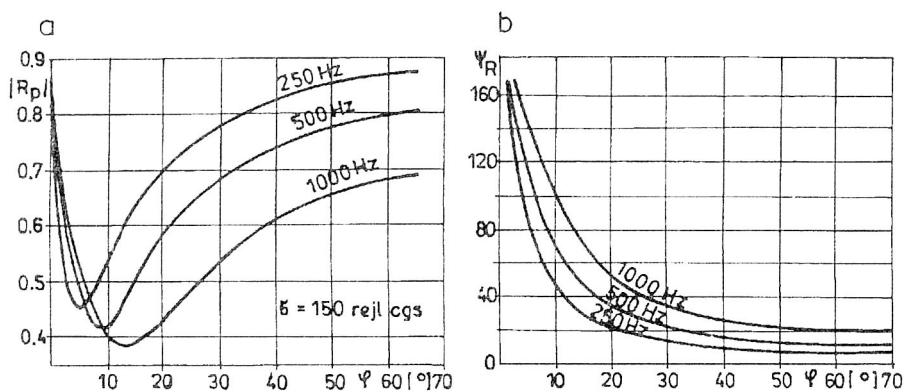
Z - impedancja normalna dla powierzchni gruntu,

ϕ - kąt padania fali, wg rys.7.5.

Dla powierzchni miejscowo reagującej, dla której impedancja Z nie zależy od kąta padania, po oznaczeniu $\beta = \rho_0 c / Z$ zależność (7.2a) upraszcza się do postaci

$$R_p = \frac{\sin\phi - \beta}{\sin\phi + \beta}. \quad (7.2b)$$

⁶⁸Większość rozwiązań [16][29][37][38][179][184] opiera się na wcześniejszym rozwiązaniu Van der Pola, podanym dla fal elektromagnetycznych. Z rozważań teoretycznych przedstawionych w tych pracach wynika, że fala powierzchniowa i przygruntowa odpowiedzialne są za rozchodzenie się na duże odległości dźwięków niskoczęstotliwościowych. Matematycznie obecność tych fal nie podlega dyskusji, natomiast fizyczne ich występowanie jest przedmiotem poważnych sporów zarówno z punktu widzenia teoretycznego jak i doświadczalnego [5].



Rys. 7.6. Charakterystyka współczynnika odbicia R_p dla powierzchni gruntu pokrytej trawą w funkcji kąta padania ϕ dla różnych częstotliwości f , wg (7.2a): a) moduł $|R_p|$, b) faza ψ_R

Fig. 7.6. Characteristic of the reflection coefficient R_p for the ground surface covered with grass as a function of angle ϕ of incidence for different frequencies f , acc. to (7.2a): a) module $|R_p|$, b) phase ψ_R

Ze wzoru (7.2) wynika, że jeżeli odległość $r \rightarrow \infty$ lub $\phi \rightarrow 0$, to wtedy $R_p \rightarrow -1$. Przyjęcie w tym przypadku R_p zamiast Q dla małych kątów padania może prowadzić do przewidywania zerowej propagacji między źródłem i odbiornikiem. Przebieg zmian modułu współczynnika odbicia $|R_p|$ oraz fazy ψ wyznaczone wg (7.2a) dla dwóch typów powierzchni gruntu: pokrytej trawą ($\sigma=150$) oraz asfaltem ($\sigma=30000$), pokazano na rys.7.6.

Funkcja $F(w)$ opisująca wpływ wzajemnego oddziaływania czoła fali kulistej z powierzchnią o skończonej impedancji dana jest wyrażeniem:

$$F(w) = 1 + i\sqrt{\pi w} \exp(-w^2) \operatorname{erfc}(-iw), \quad (7.3)$$

gdzie:

w - odległość numeryczna, dana wzorem:

$$w^2 \approx 1/2 (ikr_2) (\beta + \sin\phi)^2, \quad (7.4)$$

$\operatorname{erfc}(w)$ - funkcja (complementary error function) zdefiniowana następująco⁶⁹:

$$\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-t^2} dt.$$

⁶⁹W literaturze można znaleźć kilka sposobów asymptotycznego rozwiązania funkcji $F(w)$, bazujące na rozwinięciu funkcji $\operatorname{erfc}(w)$ w szereg Taylora [2][3][17][179]. Właściwości funkcji $\operatorname{erfc}(z)$ podaje M.Abramowitz w *Handbook of Mathematical Functions*.

Jak wynika z wzorów (7.3) i (7.4) wielkość $F(w)$ jest złożoną funkcją wielu zmiennych $F(w) = f(k, r_1, r_2, \beta, \phi)$. Pominawszy szczegółową analizę funkcji $F(w)$, która zawarta jest m.in. w [3] [5], można wyróżnić dwa skrajne przypadki:

1) Jeżeli $w \rightarrow 0$, to $F(w) \rightarrow 1$ oraz $Q \rightarrow 1$.

Przypadek ten zachodzi: dla małych odległości r (rys.7.5), dla małych częstotliwości f lub dużych wartości impedancji Z . Wypadkowe pole akustyczne nie zależy od typu podłoża (propagacja jak dla powierzchni odbijającej).

2) Jeżeli $w \rightarrow 1$, to $F(w) \rightarrow 0$ oraz $Q \rightarrow R_p$.

Przypadek ten zachodzi, gdy $r_1 \rightarrow \infty$ (rys.7.5) lub gdy wartość różnicy $\Delta r = r_1 - r_2$ jest duża, lub dla dużych częstotliwości f . W literaturze przedmiotu [2][5] przyjmuje się, że dla kątów padania $\phi \geq 5^\circ$, niezależnie od częstotliwości fali akustycznej oraz wartości impedancji gruntu Z , można przyjąć przybliżenie:

$$Q = R_p \quad \text{gdy} \quad \phi \geq 5^\circ, \quad (7.5)$$

które zapewnia wystarczającą dokładność obliczeń. Analiza wpływu $F(w)$ dla warunków przestrzeni zurbanizowanej, przy założeniu wysokości źródła $h_g \geq 0,5$ m, wysokości punktu obserwacji $h_r \geq 1,5$ m, odległości źródła dźwięku od punktu obserwacji $d \in (10-100)$ m oraz $f=500$ Hz wykazała, że warunek (7.5) można przyjąć już dla $\phi \geq 2^\circ$.

Model impedancji gruntu

Do wyznaczenia impedancji powierzchni gruntu szeroko stosowana jest półempiryczna zależność wyprowadzona przez Bazley'a i Delany'ego na podstawie analizy właściwości akustycznych włóknistych materiałów pochłaniających [26]. Właściwości fizyczne powierzchni gruntu charakteryzuje tu tylko jeden parametr - efektywna oporność przepływu σ , stąd zależność ta nazywana jest często jednoparametrowym modelem impedancji⁷⁰.

Zespolona, unormowana impedancja gruntu, $Z/\rho_0 c = (R + jX)/\rho_0 c$, wynosi:

$$R/\rho_0 c = 1 + 9,08(f/\sigma)^{-0,75}, \quad X/\rho_0 c = -11(f/\sigma)^{-0,73}, \quad (7.6)$$

gdzie:

$\rho_0 c$ - odporność właściwa powietrza,

f - częstotliwość fali akustycznej, w Hz;

σ - efektywna oporność przepływu powierzchni gruntu, w rejł cgs.

⁷⁰ Istnieje kilka alternatywnych modeli względem tego modelu. Attenborough [5] np. rozszerzył na materiały ziarniste klasyczną teorię propagacji dźwięku w sztywnym, porowatym ośrodku. Do modelu impedancji powierzchni materiału wprowadził przy tym cztery parametry, m.in. porowatość Ω . Jednak używanie czteroparametrowego modelu impedancji jest raczej mało praktyczne w odniesieniu do powierzchni gruntu.

Zespolona, unormowana stała falowa $k/k_0 = (\alpha + j\beta)/k_0$ dla powierzchni gruntu, która występuje w zależności (7.2), wynosi:

$$\alpha_2/k_0 = 1 + 10,8(f/\sigma)^{-0,73}, \quad \beta_2/k_0 = 11(f/\sigma)^{-0,59}, \quad (7.7)$$

gdzie:

k_0 - jak we wzorze (7.2),

pozostałe oznaczenia jak we wzorze (7.6).

Efektywna oporność przepływu σ

Dla powierzchni gruntu efektywna oporność przepływu σ przyjmuje wartości z zakresu $(10+30000)$ [w cgs]. Małe wartości σ odpowiadają silnie pochłaniającym powierzchniom gruntu, natomiast duże σ charakteryzuje powierzchnie silnie odbijające. Według badań Embletona i in. [31] wartości efektywnej oporności przepływu σ dla typowych warunków przestrzeni zurbanizowanej wynoszą:

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| - powierzchnia pokryta trawą | - $\sigma = 150-300$ [w cgs] |
| - pobocze drogi | - $\sigma = 300-800$ " |
| - ubita ziemia | - $\sigma = 4000-8000$ " |
| - asfalt, beton | - $\sigma \geq 20\ 000$ " |

7.2.4. Parametry pola akustycznego

W prognozowaniu klimatu akustycznego w środowisku zewnętrznym interesującym parametrem charakteryzującym wypadkowe pole akustyczne jest poziom ciśnienia L_{pk} w tercjowym lub oktawowym pasmie częstotliwości oraz skorygowany poziom dźwięku L_A . Załóżmy zatem, że w rozpatrywanej przestrzeni zurbanizowanej znajduje się n_s niezależnych, stacjonarnych, wszechkierunkowych punktowych źródeł dźwięku S o znanej mocy akustycznej W oraz położeniu O_{Se} . Oznaczmy przez $L_{wk,j}$ poziom mocy akustycznej w k -tym pasmie częstotliwości j -tego źródła punktowego. Na podstawie (3.3) poziom ciśnienia akustycznego $L_{pk,ji}$ od źródła S_j w punkcie obserwacji O_i wynosi:

$$L_{pk,ji} = L_{wk,j} - 10\lg(4\pi) + 10\lg(F_{p,k}(O_{Se,j}, O_i)), \quad (7.8)$$

a skorygowany poziom dźwięku $L_{A,ji}$ wynosi:

$$L_{A,ji} = 10\lg \left[\sum_k 10^{0,1(L_{pk,ji} - A_k)} \right], \quad (7.9)$$

gdzie:

$F_p(\)$ - funkcja propagacji między źródłem S_j i punktem O_i wyznaczona dla rozpatrywanej przestrzeni zurbanizowanej na podstawie reguł podanych w rozdz.6 oraz założeń przyjętych w rozdz.7.2.1 i 7.2.2,

A_k - poprawka w k-tym pasmie częstotliwości wg krzywej korekcyjnej A.

Jeżeli źródło elementarne jest stacjonarnym źródłem fizycznym to na podstawie def.3.7 funkcja propagacji F_p jest opisana wyrażeniem (6.29), w którym uwzględniono korelację między falami docierającymi do punktu obserwacji wzdłuż różnych tras promieni dźwiękowych. Jeżeli źródło elementarne jest źródłem zastępczym lub zaniedbamy efekt interferencji to wystarczy uwzględnić pierwszy składnik w wyrażeniu (6.29). Wówczas zachodzi:

$$F_p = \sum_i^N T_{pi}^2, \quad (7.10)$$

gdzie:

N - liczba możliwych tras promieni dźwiękowych między źródłem S_j i punktem O_i .

Założenia upraszczające przyjęte na etapie formułowania zarówno modelu źródła hałasu środowiskowego jak i modelu propagacji dźwięku, a także praktycznie losowe wartości parametrów akustycznych charakteryzujących rzeczywiste sytuacje⁷¹ powodują, że w prognozowaniu hałasu środowiskowego uzasadnione jest pominięcie zależności fazowych lub przyjęcie założenia o ich losowości.

Wypadkowy poziom $L_{x,wi}$ w punkcie obserwacji O_i jest dany zależnością:

$$L_{x,wi} = 10 \lg \sum_{j=1}^{n_s} 10^{0,1(L_{x,ji})}, \quad (7.11)$$

w której $L_{x,ji}$ oznacza poziom ciśnienia $L_{pk,ji}$; w punkcie O_i od j-tego źródła w k-tym pasmie częstotliwości lub poziom dźwięku, $L_{A,ji}$, wyznaczony odpowiednio wg (7.8) i (7.9).

Dla rzeczywistych układów urbanistycznych, gdzie występuje wiele obiektów budowlanych oraz zwykle duża liczba źródeł dźwięku, tylko zastosowanie techniki cyfrowej pozwala na wyznaczenie wszystkich możliwych tras promieni dźwiękowych oraz funkcji propagacji F_p .

⁷¹Odnosi się to zwłaszcza do powierzchni gruntu, która charakteryzuje się dużą niejednorodnością i tylko w przybliżeniu jest powierzchnią płaską. Stąd przesunięcie fazowe fal odbitych od powierzchni gruntu jest raczej wielkością losową niż zdeterminowaną, wynikającą z przyjętego modelu matematycznego. Dodatkowym czynnikiem losowym w środowisku zewnętrznym są turbulencje powietrza, które mogą powodować fluktuacje fazy wzdłuż czoła fali dźwiękowej, szczególnie w zakresie dużych częstotliwości [41].

7.3. Zastosowanie modeli emisji i propagacji do prognozowania hałasu drogowego w przestrzeni zurbanizowanej

Ruch drogowy jest głównym źródłem hałasu w dużych aglomeracjach miejskich. Poziom dźwięku hałasu drogowego w obszarach zabudowanych zależy zarówno od warunków ruchu na głównych arteriach komunikacyjnych, jak i charakteru infrastruktury urbanistycznej otaczającej te arterie. Sformułowanie metody prognozowania hałasu drogowego w przestrzeni zurbanizowanej wymaga zatem dokonania syntezy modelu źródła hałasu oraz modelu propagacji.

W pracy rozważono dwa możliwe przypadki syntezy modeli, wynikające z przyjętych wcześniej założeń (rozdz.1.1, 4.2, 5.2, 7.2) oraz optymalizacji metody obliczeniowej⁷²:

1. Rozszerzenie symulacyjnego modelu hałasu strumienia pojazdów (patrz rozdz.4) o wpływ warunków otoczenia przez modyfikację reguły generalnej (4.1), tak aby uwzględniała ona funkcję propagacji F_p dla warunków przestrzeni zurbanizowanej. Był to początkowy kierunek badań, których szczegółowe wyniki przedstawiono w [72][137][138].

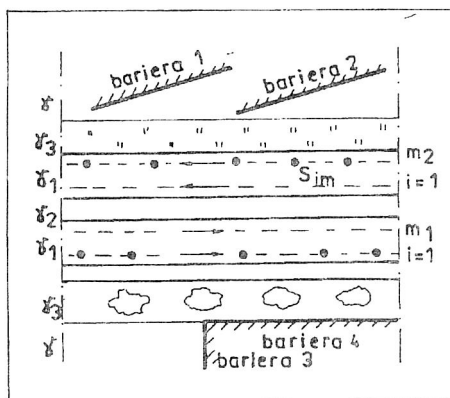
2. Włączenie do modelu propagacji dźwięku w przestrzeni zurbanizowanej czynników związanych z emisją hałasu drogowego przez odpowiednie ustalenie rozkładu i charakterystyk elementarnych źródeł dźwięku (rozdz.7.2.1).

W pierwszym przypadku, jak wykazały badania [138], przyjęcie pełnego opisu struktury źródła hałasu środowiskowego (z uwzględnieniem ruchu źródeł składowych) pociąga za sobą konieczność ograniczenia typów rozpatrywanych sytuacji urbanistycznych oraz zespołu analizowanych zjawisk elementarnych [72]. Drugi sposób podejścia, dzięki redukcji rzeczywistego ZHS do zbioru stacjonarnych źródeł punktowych, umożliwia analizę propagacji hałasu z uwzględnieniem pełnego zespołu zjawisk elementarnych dla szerokiego zakresu konfiguracji przestrzennej obiektów tworzących otoczenie arterii komunikacyjnej.

⁷²Jednym z podstawowych kryteriów oceny przydatności metody prognozowania wspomaganej komputerowo jest czas obliczeń. W modelu symulacyjnym hałasu strumienia ruchu ulicznego funkcja propagacji F_p jest związana z aktualnym położeniem ruchomego źródła elementarnego S (4.1), a więc obliczana jest dla każdego nowego położenia źródła elementarnego. Przyjmując, że na rozpatrywanym odcinku drogi w momencie t_n znajduje się średnio 20 pojazdów, dla założonego optymalnego czasu obserwacji $T=900s$ funkcja propagacji F_p obliczana jest 1800 razy. W modelu stacjonarnym F_p jest związana z wydzielonym podobszarem odcinka drogi (5.2), stąd obliczenia F_p wykonywane są jednokrotnie dla każdego podobszaru.

7.3.1. Rozszerzenie symulacyjnego modelu hałasu strumienia pojazdów o wpływ otoczenia

Uwzględniając przyjęte w rozdz.4.1 założenia⁷³, model symulacyjny hałasu strumienia pojazdów rozszerzono o wpływ podstawowych elementów urbanistycznej infrastruktury arterii, jak równoległe do osi jezdni pasy zieleni oraz bariery odbijające, ustawione pod dowolnym kątem w stosunku do osi jezdni (rys.7.7). W modelu numerycznym bariera odbijająca reprezentuje fasady budynków lub ekrany akustyczne. Promień dźwiękowy, który pada na barierę, odbija się, lecz nie ulega ugięciu na jej krawędziach.



Rys. 7.7. Schemat sytuacji drogowej oraz otoczenia przyjęty w modelu symulacyjnym do prognozowania hałasu drogowego w środowisku zurbanizowanym [138]

Fig. 7.7. Diagram of a road situation and its surroundings assumed in a simulation model for prediction of road noise in urban environment [138]

Na podstawie zależności (3.6) i (4.1), po wprowadzeniu poziomu tła akustycznego L_{A0} jako dodatkowego parametru otoczenia, otrzymujemy następującą postać zmodyfikowanej reguły generalnej RG modelu symulacyjnego:

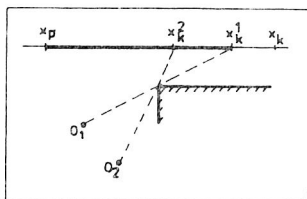
$$L_{Ak}(t_n) = \max \{ (L_{Ak}^S(t_n) \leftarrow \text{wg (7.13)}) , (L_{A0} = \text{const}) \} , \quad (7.12)$$

$$L_{Ak}^S(t_n) = 10 \lg \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m(t_n)} \frac{W_{Aim}(V_i, k_m)}{W_o 4\pi r_o^2} \left(F_p(o_{sim}(t_n), o_k) \wedge [F_p \leftarrow \text{wg (7.14)}] \right) \right\} , \quad (7.13)$$

⁷³Ruchome źródła elementarne umieszczone na wysokości $h_s=0$ m są scharakteryzowane przez skorygowaną moc akustyczną L_{WA} .

gdzie:

- $L_{Ak}(t_n)$ - wypadkowy poziom dźwięku w k-tym punkcie obserwacji w momencie t_n z uwzględnieniem poziomu tła akustycznego,
 $L_{Ak}^s(t_n)$ - poziom dźwięku w k-tym punkcie obserwacji w momencie t_n wygenerowany przez model wg reguły (7.13),
 $\max$ - oznacza większą z wartości L_{Ak}^s i L_{A0} ,
 $O_{sim}(t_n)$ - położenie i-tego źródła na m-tym pasie w momencie t_n ,
 O_k - położenie k-tego punktu obserwacji,
 F_p - funkcja propagacji otoczenia wyznaczona między punktami O_{sim} i O_k w momencie t_n wg (7.14).
 (pozostałe oznaczenia jak w (3.6) i (4.1))



Rys. 7.8. Zmiana długości obserwowanego odcinka drogi (x_p, x_k) w wyniku efektu ekranowania: (x_p, x_k^1) - odcinek drogi dla punktu O_1 , (x_p, x_k^2) - dla punktu O_2

Fig. 7.8. Change of length of the observed road segment (x_p, x_k) as a result of the screen effect: (x_p, x_k^1) - road segment of for point O_1 , (x_p, x_k^2) - for point O_2

W praktycznej realizacji modelu symulacyjnego przyjęto kilka założeń upraszczających model propagacji dźwięku w otoczeniu arterii komunikacyjnej. Wynikały one z wcześniejszych założeń, które przyjęto w trakcie budowy modelu symulacyjnego hałasu strumienia pojazdów (patrz rozdz.4.1), a także możliwości maszyny cyfrowej i czasu obliczeń numerycznych⁷⁴. Podobne założenia przyjmowane są w wielu wcześniejszych i późniejszych pracach (np. założenie (1) i (2) w [108] i [192], założenie (4) w [81][99][106] [195])

Założenia:

1. Pomija się zjawisko ugięcia (w obszarze cienia akustycznego przeszkody nie rozchodzi się fala akustyczna).

2) Efekt ekranowania przez bariery odbijające, uwzględnia się przez redukcję długości obserwowanego odcinka drogi (patrz reguła RO3 - rozdz.4) do odcinka widzianego bezpośrednio z danego punktu obserwacji, jak pokazano na rys.7.8.

⁷⁴ W początkowym okresie budowania modeli symulacyjnych (pierwsza połowa lat 80.) dysponowano MC o pamięci operacyjnej 64K.

Uwzględnienie, dla ruchomych źródeł dźwięku, pełnego opisu przestrzeni oraz wszystkich zjawisk elementarnych związanych z propagacją prowadzi do bardzo długiego czasu obliczeń, co podważa celowość stosowania modelu do prognozowania.

3) Dla punktów obserwacji położonych na wysokości $h_g \leq 2$ m, wpływ pochłaniających właściwości powierzchni gruntu uwzględnia się przez wprowadzenie współczynnika tłumienia γ [6][28], który ujmuje sumarycznie wpływ tłumienia w powietrzu oraz tłumienia przez powierzchnię gruntu.

4) Parametry akustyczne będące funkcją częstotliwości przyjmują wartości jak dla $f=500$ Hz⁷⁵.

Dla przyjętych powyżej założeń, na podstawie wzorów (3.7), (6.3) i (6.29), pomijając w tym przypadku zależności fazowe (rozdz.7.3), otrzymujemy następujące wyrażenie opisujące funkcję propagacji i-tej trasy promienia dźwiękowego o całkowitej długości d_i :

$$F_p = T_{pi}^2 = d_i^{-2} \exp\left(\sum_{j=1}^{n_p} (-\gamma_j d_{ij})\right) \prod_{b=1}^{n_b} |R_b|, \quad (7.14)$$

gdzie:

- γ_j - współczynnik pochłaniania powierzchni dla j-tego pasa terenu (rys.7.7),
- d_{ij} - długość odcinka i-tej trasy na j-tym pasie terenu,
- R_b - energetyczny współczynnik odbicia dla b-tej bariery,
- n_p, n_b - odpowiednio: liczba pasów terenu oraz liczba barier odbijających występujących na i-tej trasie.

7.3.2. Model propagacji hałasu drogowego w przestrzeni zurbanizowanej

Ogniwem łączącym stacjonarny model źródła hałasu drogowego i model propagacji dźwięku w przestrzeni zurbanizowanej są parametry wyjściowe i wejściowe tych modeli.

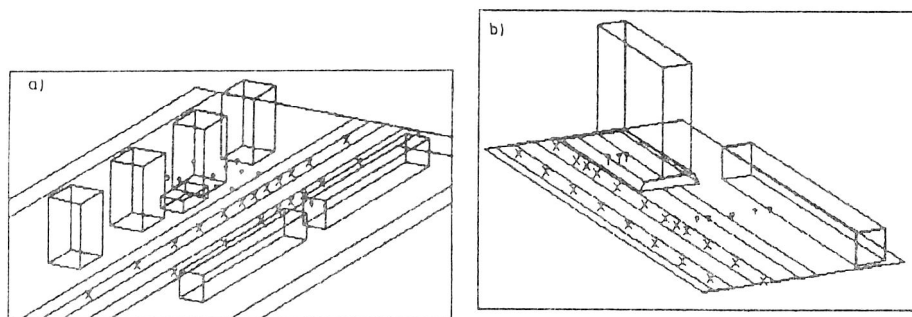
Przyjmuje się, że w modelu propagacji hałasu drogowego w przestrzeni zurbanizowanej odcinek drogi, (rozpatrywany jako ZHS), jest reprezentowany przez zbiór elementarnych źródeł punktowych S , przy czym:

- liczbę N_e źródeł punktowych S oraz ich położenie O_s określają reguły modelu struktury źródła sformułowane w rozdz.5.3,
- poziom mocy akustycznej $L_{wk,j}$ j-tego źródła w k-tym pasmie oktawowym określają reguły modelu hałasu źródła elementarnego sformułowane w rozdz.5.4.3 i 5.4.4:

$$L_{wk,j} = [L_{AW,j} \leftarrow \text{wg (5.11)}] - [\Delta L_{wk} \leftarrow \text{wg (tab. 5.2)}], \quad (7.15)$$

Na rysunku 7.9 pokazano przykładowo widok numerycznego modelu arterii komunikacyjnej oraz otaczającej ją infrastruktury urbanistycznej.

⁷⁵ Częstotliwość, dla której występuje maksimum w skorygowanym widmie hałasu ruchu drogowego [99][106][195].



Rys. 7.9. Widok badanej sytuacji urbanistycznej, wg modelu numerycznego:
 a) sytuacja jak na rys.7.16c, b) jak na rys. 7.16b; (x) - elementarne źródło dźwięku S_{ij} , (·) - punkt obserwacji
 Fig. 7.9. View of an investigated urban situation, acc. to the numerical model: a) situation as in Fig. 7.16c. b) as in Fig. 7.16b; (x) - elementary sound source S_{ij} , (·) - observer

7.4. Weryfikacja eksperymentalna metody prognozowania

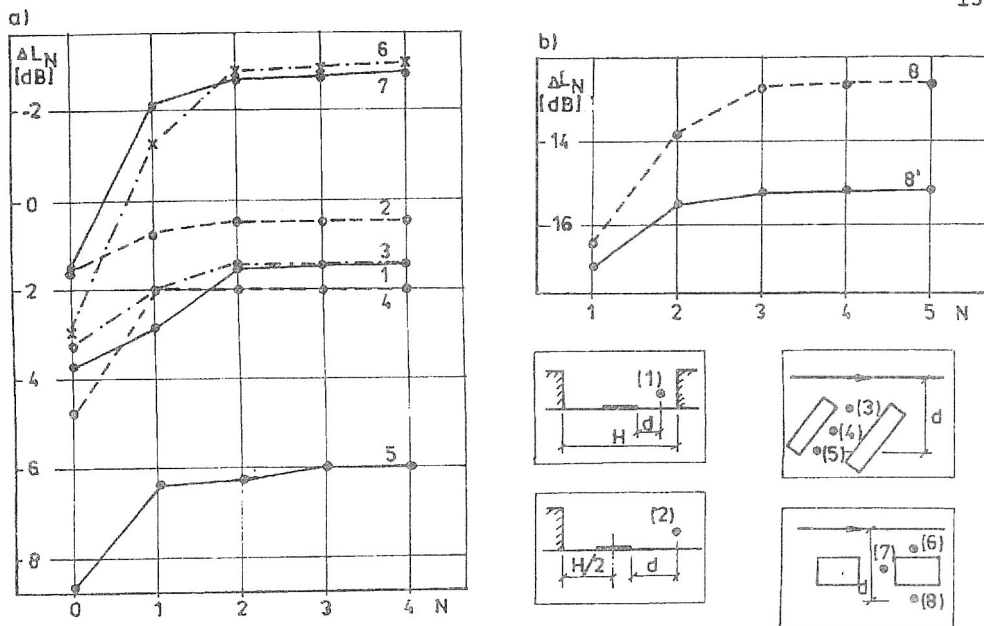
Podstawowym kryterium weryfikacji metody prognozowania jest zgodność wartości uzyskanych na drodze obliczeń z wartościami wyznaczonymi eksperymentalnie. Ze względu na dużą różnorodność struktur urbanistycznych, znaczny wpływ czynników przypadkowych, takich jak zmienne warunki atmosferyczne czy poziom tła akustycznego, a także czasochłonność pomiarów terenowych, przeprowadzenie statystycznie wiarygodnej weryfikacji eksperymentalnej prezentowanej metody prognozowania przekracza ramy niniejszej pracy. Dlatego weryfikację oparto na bezpośrednim porównaniu wyników pomiarów i obliczeń dla kilku typowych sytuacji urbanistycznych. Przeprowadzono równocześnie szczegółową analizę błędów metody prognozowania (patrz rozdz.2.5).

7.4.1. Analiza błędu metody

Błąd metody numerycznej

W omawianej metodzie źródeł pozornych błąd metody numerycznej jest wynikiem aproksymacji rzeczywistej funkcji propagacji F_p skończoną sumą transmitancji możliwych tras promieni dźwiękowych, wynikającą z maksymalnego dopuszczalnego rzędu N obrazu pozornego. Błąd metody numerycznej δ_N , wynikający z ograniczonego rzędu obrazu pozornego N , definiuje się jako różnicę między wartością poziomu dźwięku L_N , wyznaczoną dla N -tego rzędu źródła pozornego, oraz wartością L_∞ przy założeniu, że $N \rightarrow \infty$:

$$\delta_N = L_N - L_\infty, \quad (7.16)$$



Rys. 7.10. Przebieg zmian różnicy ΔL_N między zmierzonym i obliczonym ekwiwalentnym poziomem dźwięku L_{AeqT} w funkcji rzędu obrazu pozornego N , wyznaczonych dla sytuacji jak na rys.7.16, w pokazanych na schematach punktach obserwacji: 1 - zabudowa dwustronna: $H=16$ m, $d=4,5$ m, 2 - zabudowa jednostronna: $H/2=6,5$ m, $d=4,5$ m, 3,4,5 - zabudowa pod kątem: $d=14$ m, $d=45$ m, $d=75$ m, 6,7,8 - zabudowa luźna: 8' - obliczenia z pominięciem zjawiska dyfrakcji

Fig. 7.10. Changes of difference ΔL_N between the measured and calculated equivalent sound level L_{AeqT} versus the image order N , determined for the situation as in Fig. 7.16, in the receivers shown in the diagrams: 1 - two-sided building: $H=16$ m, $d=4.5$ m, 2 - one-sided building: $H/2=6.5$ m, $d=4.5$ m, 3,4,5 - building at the angle: $d=14$ m, $d=45$ m, $d=75$ m, 6,7,8 - scattered building: 8' - calculations with the diffraction effect omitted

Wartość błędu δ_N maleje wraz ze wzrostem rzędu N , przy czym szybkość zmian oraz bezwzględna wartość tego błędu zależą od geometrii rozpatrywanej przestrzeni propagacji. Rośnie równocześnie czas analizy numerycznej⁷⁶, co przy dużej liczbie źródeł dźwięku i punktów obserwacji może

⁷⁶W metodzie obrazów pozornych przy analizie wszystkich możliwych tras promieni dźwiękowych czas obliczeń rośnie w postępie geometrycznym wraz z liczbą rzędu obrazu pozornego [74].

prorowadzić do bardzo długich czasów obliczeń. Ustalenie optymalnej wartości N , ze względu na błąd modelu oraz czas obliczeń, ma podstawowe znaczenie przy stosowaniu modelu zarówno w eksperymentach o charakterze badawczym, jak i do rozwiązywania praktycznych zagadnień. Wykonano badania symulacyjne [138] dla typowych układów urbanistycznych: zabudowy równoległej (jednostronnej i dwustronnej), zabudowy ustawionej pod kątem do jezdni, a także zabudowy luźnej. Dla odległości $d < 100$ m od jezdni błąd metody numerycznej szybko maleje ze wzrostem N i można przyjąć (rys.7.10)

$$\delta_N \Rightarrow 0, \text{ gdy } N \geq 3, \quad (7.17)$$

Ponadto, uzyskane wyniki obliczeń wskazują:

- dla zabudowy równoległej istotne jest uwzględnienie pierwszego odbicia od fasad budynków, natomiast wkład odbić wyższego rzędu mieści się w granicach błędu symulacji (patrz rozdz.4.5),

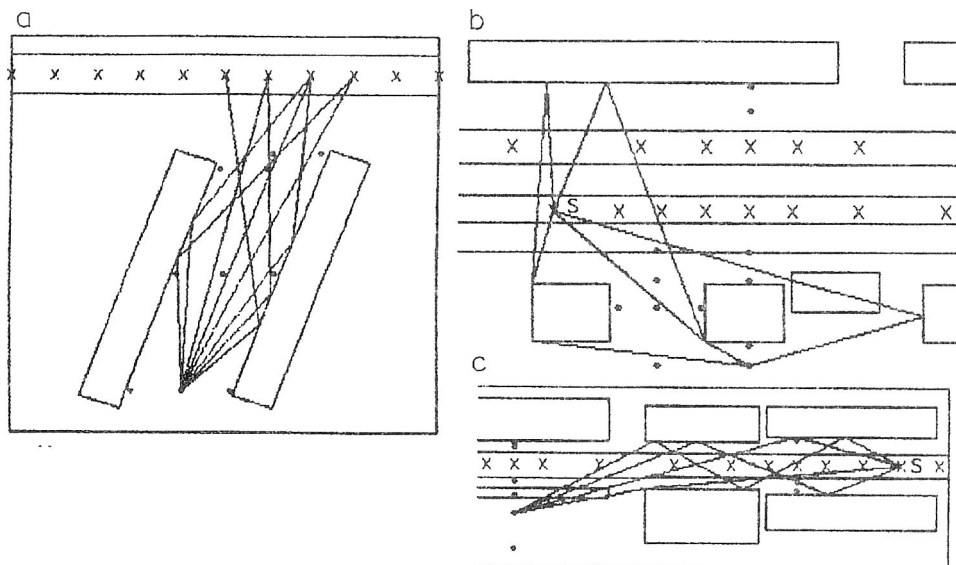
- dla zabudowy ustawionej pod kątem do jezdni, znaczący wkład odbić wyższego rzędu obserwuje się dla punktów położonych w odległości $d \geq 50$ m od jezdni.

W celu ilustracji tego problemu na rys.7.10 pokazano przebieg różnicy ΔL_N między zmierzonymi i obliczonymi wartościami poziomu L_{AeqT} hałasu ruchu ulicznego w funkcji rzędu obrazu pozornego N , dla różnego typu zabudowy⁷⁷. Obliczenia wykonano zgodnie z metodą prognozowania przedstawioną w rozdz.7.3.2. Nachylenie krzywej $\Delta L_N = f(N)$ można interpretować jako błąd metody numerycznej, natomiast bezwzględna wartość ΔL_N jest wynikiem błędów parametrów wejściowych, błędów metody oraz błędów pomiaru. Jak widać dla $N \geq 3$ następuje stabilizacja wartości ΔL_N dla wszystkich rozpatrywanych sytuacji. Duże różnice między zmierzonymi i obliczonymi wartościami L_{AeqT} dla punktów (5) i (8) (rys.7.10) spowodowane są wysokim poziomem tła akustycznego występującego podczas pomiaru.

Podobne wnioski wynikają z analizy dominujących tras promieni dźwiękowych, której przykładowe wyniki dla typowych sytuacji urbanistycznych w otoczeniu arterii (patrz tab.7.1) ilustruje rys.7.11. Na rysunkach pokazano dominujące⁷⁸ trasy promieni dźwiękowych wyznaczone między wskazanym punktem obserwacji O i wszystkimi źródłami dźwięku (rys.7.13a) lub wyróżnionym źródłem S (rys.7.13b,c).

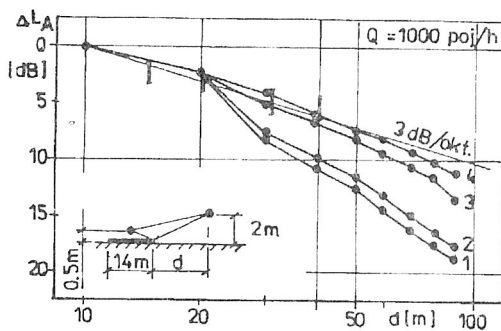
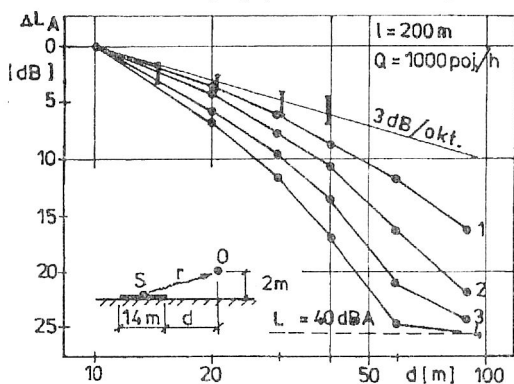
⁷⁷Pomiary przeprowadzone zostały we Wrocławiu w godzinach szczytu komunikacyjnego [72][74].

⁷⁸Przez pojęcie dominujące trasy rozumie się takie trasy, dla których tłumienie dźwięku $\Delta L = 10 \lg(F_p)$ jest większe o mniej niż 10dB od najmniejszego tłumienia wyznaczonego dla wszystkich możliwych tras promieni dźwiękowych.



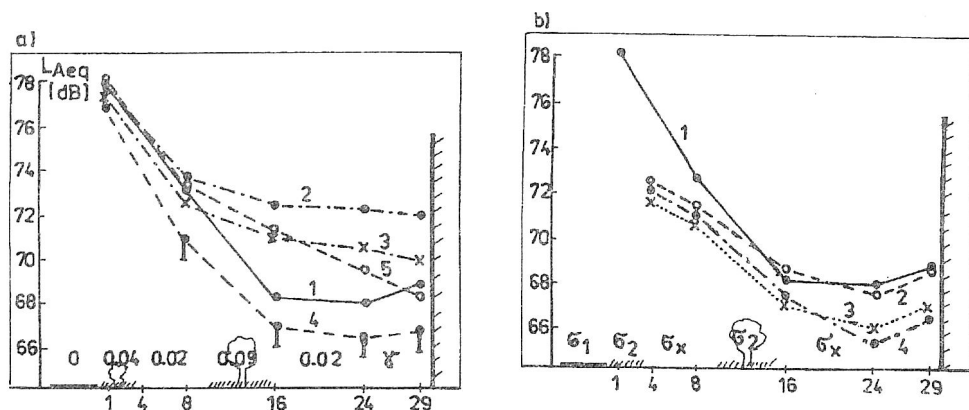
Rys. 7.11. Dominujące trasy promieni dźwiękowych wyznaczone wg modelu numerycznego dla sytuacji jak na rys.7.16: a) od wszystkich elementarnych źródeł dźwięku, b) i c) od wyróżnionego źródła elementarnego S; (x) - elementarne źródło dźwięku S, (•) - punkty obserwacji

Fig. 7.11. Dominating sound rays paths determined acc. to the numerical model for the situation as in Fig. 7.16: a) for all elementary sound sources, b) and c) for the chosen elementary source S; (x) - elementary sound source, (•) - observation points



Rys. 7.12. Zmiany poziomu hałasu drogowego w funkcji odległości d od drogi, wyznaczone dla różnych typów powierzchni gruntu w przestrzeni otwartej: a) model symulacyjny: $\gamma=0,02$ (1), $\gamma=0,04$ (2), $\gamma=0,07$ (3), $\gamma=0,1$ (4), b) model propagacji dźwięku: $\sigma=150$ (1), $\sigma=300$ (2), $\sigma=4000$ (3), $\sigma=8000$ [w cgs] (4); $\square$ - zakres zmian wartości zmierzonych dla powierzchni pokrytej trawą [93][138]

Fig. 7.12. Changes of traffic noise level versus distance d from the road, determined for different types of road surface in open space: a) simulation model: $\gamma=0.02$ (1), $\gamma=0.04$ (2), $\gamma=0.07$ (3), $\gamma=0.1$ (4), b) sound propagation model: $\sigma=150$ (1), $\sigma=300$ (2), $\sigma=4000$ (3), $\sigma=8000$ (4) [cgs units]; $\square$ - range of measured values for grass covered ground [93][138]



Rys. 7.13. Porównanie zmierzonego (1) i obliczonego (2-5) spadku ekwiwalentnego poziomu dźwięku w funkcji odległości d od jezdni dla sytuacji jak na rys.7.16b (p.B-B) i parametrów ruchu jak w tab.7.1[93][138]: a) model symulacyjny: 2 - $\gamma=0$, 3 - $\gamma=0,02$, 4 - z uwzględnieniem pasów zieleni jak na rys.(a), 5 - $\gamma=0$ dla terenu otwartego, b) model propagacji dźwięku: 2 - jezdnie - $\sigma_1=30000$, pasy zieleni - $\sigma_2=150$, pozostały obszar $\sigma_x=8000$, 3 - jak (2) lecz $\sigma_x=300$, 4 - jak (2) lecz dla terenu otwartego, I - błąd symulacji (patrz rozdz.4.5)

Fig. 7.13. Comparison of the measured (1) and calculated (2-5) variation of the equivalent sound level versus distance d from the road for the situation as in Fig. 7.16b (cross-section B-B) and traffic parameters as in Tab. 7.1 [93][138]: a) simulation model: 2 - $\gamma=0$, 3 - $\gamma=0,02$, 4 - taking into consideration the green belt as in the Figure (a), 5 - $\gamma=0$ for open terrain, b) propagation model: 2 - roadway - $\sigma=30000$ [cgs units], green belt - $\sigma_1=150$, the rest of the area $\sigma_x=8000$, 3 - as in (2) but $\sigma_x=300$, 4 - as in (2) but for open terrain, I - simulation error (as in chapter 4.5)

Błąd parametrów wejściowych

Wprowadzane do modelu wartości parametrów akustycznych przestrzeni zurbanizowanej są na ogół tylko wartościami prawdopodobnymi. Przeprowadzona⁷⁹ analiza wpływu zmian wartości parametrów akustycznych przestrzeni zurbanizowanej na wynik obliczeń wskazuje, że podanie szacunkowych wartości parametrów charakteryzujących powierzchnię gruntu (rys.7.12a,b) oraz poziomu tła akustycznego (rys.7.13 i 7.14) może być przyczyną is-

⁷⁹Temat badawczy ITA realizowany pod kierunkiem autorki Opracowanie symulacyjnego modelu otoczenia arterii komunikacyjnej.

totnych rozbieżności między wynikiem pomiaru i obliczeń. Wpływ wartości współczynnika odbicia R od fasad budynków, dla $Re(0,5-1)$, jest pomijalnie mały ($\Delta L_A < 0,5$ dB) [138].

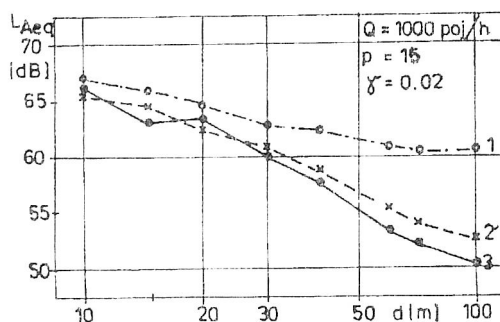
Wpływ zmiany wartości parametrów γ i σ na wynik prognozy

Wartości współczynników pochłaniania γ oraz oporności przepływu σ podawane przez różnych autorów dla takiego samego rodzaju powierzchni różnią się znacznie. Przykładowo, współczynnik γ dla powierzchni pokrytej trawą wynosi od 0,023 do 0,040 m^{-1} [1][6][28], a oporność przepływu σ od 150 do 300 [w cgs] [31][53]. Jest to wynikiem dużej niejednorodności cechującej strukturę powierzchni gruntu (patrz rozdz.7.2.3), a także zmiany właściwości powierzchni w zależności od warunków atmosferycznych i pory roku.

Wyniki analizy porównawczej badań symulacyjnych, z wykorzystaniem obu typów modeli propagacji dźwięku nad powierzchnią gruntu (patrz rozdz.7.2.2 i 7.4.1) oraz pomiarów, ilustruje rys.7.12. Na rysunku tym pokazano spadek poziomu dźwięku ΔL_{AeqT} w funkcji odległości d od jezdni, obliczony dla różnych wartości parametrów γ (rys.7.12a) i σ (rys.7.12b), na tle przedziału zmian wartości zmierzonych dla powierzchni pokrytej trawą w warunkach zbliżonych do przestrzeni otwartej⁸⁰. Z przeprowadzonej analizy wynika, że model propagacji fali tłumionej (7.14) jest czuły na wartość parametru γ . Dla powierzchni pokrytej trawą różnice między wartościami L_{AeqT} wygenerowanymi dla $\gamma=0,02$ i $\gamma=0,04$ wynoszą ok. 2dB dla odległości $d \in (20-50)m$ i rosną wraz ze wzrostem odległości d (rys.7.12a). W modelu odbicia od powierzchni gruntu, błąd parametru σ jest mniejszy. Dla $\sigma \in (150-300)$, charakteryzującej powierzchnię pokrytą trawą, różnica między wyznaczonymi wartościami L_{AeqT} wynosi ok. 1dB, niezależnie od odległości. Można także zauważyć, że dla $d < 50$ m wyniki pomiarów zbliżone są do wartości obliczonych dla powierzchni słabo pochłaniającej ($\gamma \leq 0,02$, $\sigma = 8000$). Przyczyną małego spadku mierzonych poziomów hałasu może być wysoki poziom tła akustycznego występującego podczas pomiarów, którego wpływ rośnie wraz ze wzrostem odległości punktu pomiarowego od jezdni (por. rys.7.14). Ograniczony materiał badawczy nie pozwala jednak na wyciągnięcie zbyt daleko idących wniosków.

Na rysunku 7.13 pokazano porównanie zmierzonych i obliczonych, dla różnych wartości parametrów γ i σ , zmian ekwiwalentnego poziomu L_{AeqT} w funkcji odległości d od jezdni dla niejednorodnej powierzchni gruntu:

⁸⁰ Pomiary hałasu wykonano dla odcinków drogi o różnej szerokości i liczbie pasów ruchu. W celu wyeliminowania wpływu geometrycznego pola bliskiego (patrz rozdz.3.7) spadek ΔL_{AeqT} wyznaczono w stosunku do poziomu występującego w odległości $d=10$ m od jezdni. Pomiary ograniczono do odległości $d \leq 50$ m ze względu na wysoki poziom tła akustycznego.



Rys. 7.14. Zmiany ekwiwalentnego poziomu L_{AeqT} generowanego przez model symulacyjny w funkcji odległości d od jezdni, dla różnych wartości parametru L_{A0} : 1 - 60 dB, 2 - 50 dB, 3 - 40 dB [138]. Parametry ruchu: $Q=1000$ poj/h, $p_c=20\%$, $V=50$ km/h

Fig. 7.14. Changes of equivalent level L_{AeqT} generated by the simulation model as a function of distance d from the roadway, for different values of parameter L_{A0} : 1 - 60 dB, 2 - 50 dB, 3 - 40 dB [138]. Traffic parameters: $Q=1000$ poj/h, $p_c=20\%$, $V=50$ km/h

betonowej powierzchni przedzielonej wąskimi pasami trawy i zieleni. Ponieważ porównywane są estymatory poziomu L_{AeqT} uzyskane w wyniku jednokrotnego pomiaru oraz jednokrotnej symulacji, na rys.7.13a zaznaczono wartość błędu pomiaru oraz błędu symulacji poziomu L_{AeqT} wg tab.4.3. Zgodnie z oczekiwaniami model symulacyjny generuje wartości zgodne z wynikami pomiarów dla odległości $d=1$ m od jezdni (patrz rozdz.4.5). Dla odległości $d>10$ m zgodność wyników zależy w dużej mierze od przyjętej wartości parametru γ , przy czym optymalne wyniki otrzymuje się dla stosunkowo dużych wartości parametru γ (por. rys.7.12). Rezultaty prognozy uzyskanej na podstawie modelu propagacji dźwięku w przestrzeni wykazują dobrą zgodność z wynikami pomiaru, gdy $d>10$ m, dla wartości parametru σ właściwych dla rodzaju terenu.

Wpływ zmiany poziomu tła akustycznego L_{A0} na wynik prognozy

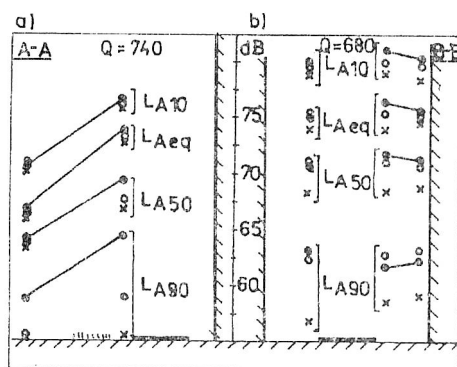
Wpływ wartości parametru wejściowego L_{A0} na generowane przez model symulacyjny wartości parametrów wyjściowych, L_{def} badano dla warunków przestrzeni otwartej ($\gamma=0,02$) dla wartości L_{A0} z zakresu (40+60) dB. Stwierdzono, że dla natężenia ruchu $Q=1000$ poj/h wpływ ten obserwuje się już dla odległości $d>20$ m. Z analizy porównawczej wyników pomiarów i symulacji wynika, że do eksperymentalnej weryfikacji modelu za wartość parametru L_{A0} należy przyjmować wartość poziomu L_{A99} , wyznaczoną na podstawie pomiaru. Na rys.7.15 przedstawiono przykładowo porównanie wyników pomiarów i symulacji, które uzyskano dla różnych wartości parametru L_{A0} .

Schemat badanego układu urbanistycznego przedstawiono na rys.7.16a, a parametry ruchu w tab.7.1.

Tabela 7.1

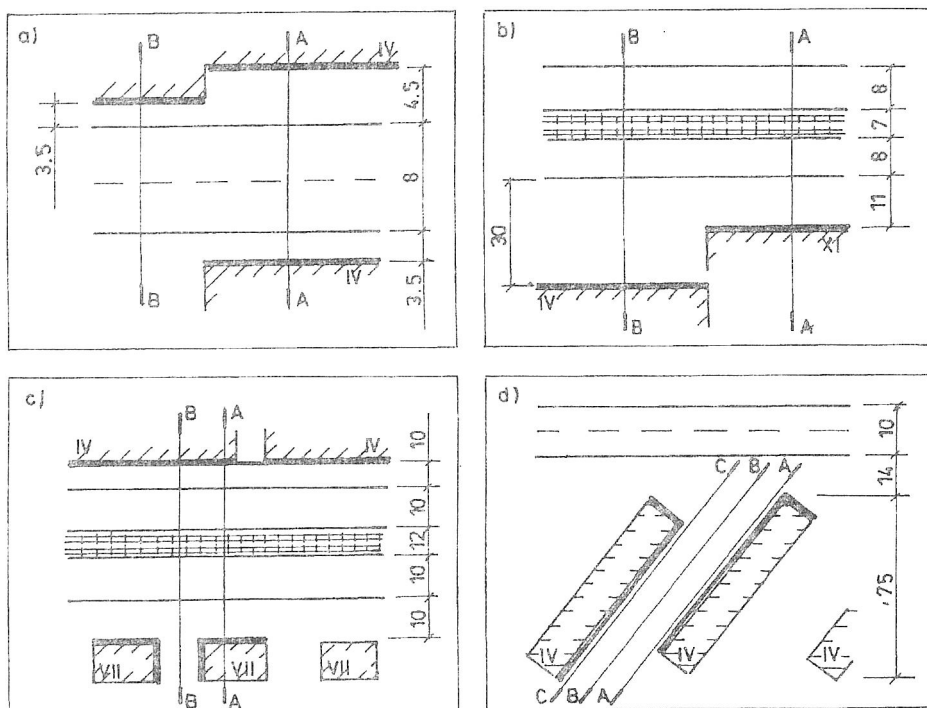
Charakterystyki badanych układów urbanistycznych [138]

Układ	U1	U2	U3	U4
<u>Arteria</u>	Dwupasmowa, jednokierunkowa	Czteropasmowa dwukierunkowa wydzielone torowisko	Dwupasmowa dwukierunkowa	Czteropasmowa dwukierunkowa torowisko
Q_k [poj/h]	740	740,700	700,500	760,700
p_c [%]	9	19,20	20,20	16,15
V_o/V_c [km/h]		55/45	60/45	45/35
Zabudowa: lewa str.	Dwustronna: ciągła, równoległa	Jednostronna: -	Jednostronna: -	Dwustronna: ciągła, równoległa
prawa str.	ciągła, równoległa	równoległa, zmienna odległość	pod kątem 70° do osi jezdni	luźna, punktowa



Rys. 7.15. Porównanie wyników pomiarów (•) i symulacji hałasu ruchu drogowego dla sytuacji jak na rys.7.16a: a) zabudowa jednostronna (przekrój B-B), b) dwustronna (przekrój A-A); symulacja: (•) - $L_{A0}=55$ dB, (x) - $L_{A0}=40$ dB, (N=2) [138]

Fig. 7.15. Comparison of the results of traffic noise measurements (•) and simulation for situation as in Fig. 7.16a: a) one-sided building (cross-section B-B), b) two-sided (cross-section A-A); simulation: (•) - $L_{A0}=55$ dB, (x) - $L_{A0}=40$ dB, (N=2) [138]

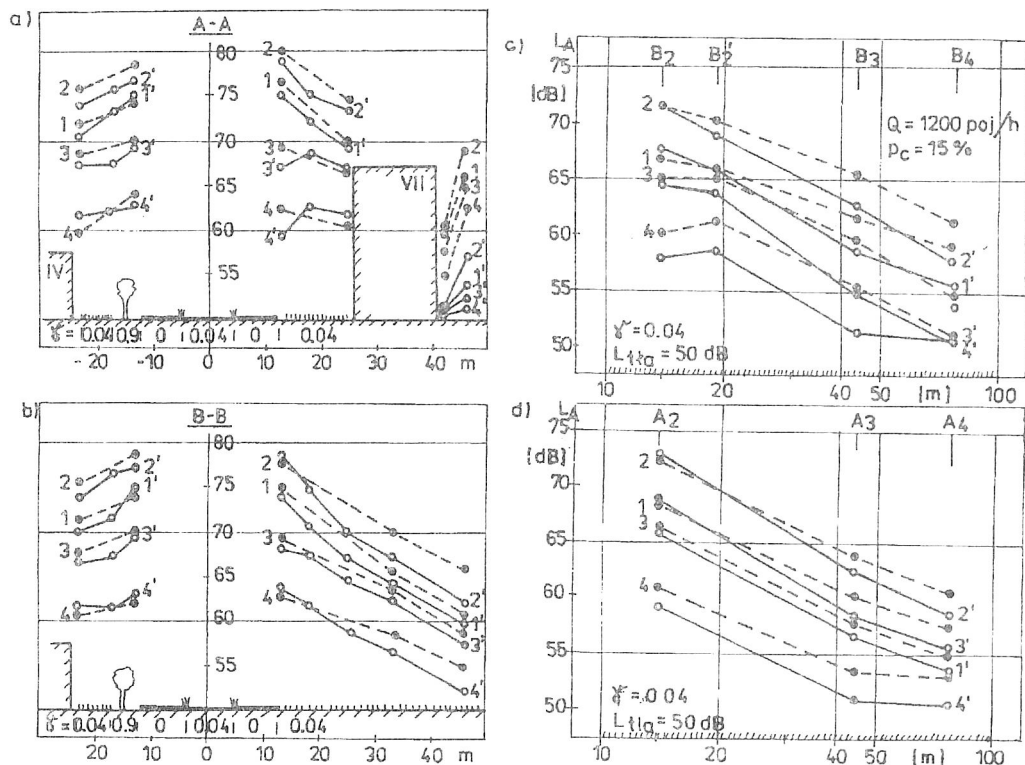


Rys. 7.16. Schematy badanych układów przestrzeni zurbanizowanej: a) zabudowa dwustronna (Wrocław, ul. Szewska), b) zabudowa jednostronna (Wrocław, ul. Grabiszyńska), c) zabudowa dwustronna, mieszana (Wrocław, ul. Piłsudskiego), d) zabudowa jednostronna, pod kątem (Wrocław, ul. Zachodnia)

Fig. 7.16. Diagrams of investigated systems of urban space: a) two-sided building (Wrocław, ul. Szewska), b) one-sided building (Wrocław, ul. Grabiszyńska), c) two-sided building, different configuration (Wrocław, ul. Piłsudskiego), d) one-sided building, at the angle (Wrocław, ul. Zachodnia)

7.4.2. Wyniki weryfikacji

Badania weryfikacyjne wykonano dla czterech typowych rozwiązań zabudowy wokół arterii komunikacyjnej, których charakterystyki zestawiono w tabeli 7.1 [138]. Schematy badanych układów urbanistycznych oraz przekroje pomiarowe pokazano na rys. 7.16. Na rysunku 7.16 grubymi liniami zaznaczono fasady budynków symulowane w modelu przez bariery odbijające. Metodę pomiarów hałasu drogowego przyjęto zgodnie z ustaleniami w rozdz. 4.4.1 oraz 4.5.4. W celu minimalizacji błędu pomiaru, wynikającego ze zmiany parametrów ruchu, pomiary wykonano w godzinach szczytu komunikacyjnego równocześnie w kilku punktach pomiarowych. Ponadto dla każdego układu urbanistycznego, w kontrolnym punkcie pomiarowym (w odległości



Rys. 7.17. Porównanie wyników pomiarów (•) i symulacji (◦) hałasu ruchu drogowego dla sytuacji jak na rys.7.16 i parametrów ruchu jak w tab.7.1: a) i b) przekrój A-A i B-B (rys.7.16c), c) i d) przekrój A-A i B-B (rys.7.16d) [138]; 1 - L_{AeqT} , 2 - L_{A10} , 3 - L_{A50} , 4 - L_{A90} , parametry symulacji: $N=1$ ($d<40$ m), $N=2$ ($d>40$ m), $L_{A0}=50$ dB

Fig. 7.17. Comparison of the results of traffic noise measurement (•) and simulation (◦) for situation as in Fig. 7.16 and traffic parameters as in Tab. 7.1: a) and b) cross-section A-A and B-B (Fig. 7.16c), c) and d) cross-section A-A and B-B (Fig. 7.16d) [138]; 1 - L_{AeqT} , 2 - L_{A10} , 3 - L_{A50} , 4 - L_{A90} , simulation parameters: $N=1$ ($d<40$ m), $N=2$ ($d>40$ m), $L_{A0}=50$ dB

$d=1$ m od jezdni) prowadzono ciągłą rejestrację hałasu dla całej sesji pomiarowej. Stwierdzono, że zmiany całkowitego natężenia ruchu Q_c wyznaczonego dla kolejnych odcinków czasu, $T=15$ min. sesji pomiarowych mieszczą się w granicach $\pm 10\%$ w stosunku do wartości średniej, a zmiany po-

modelu. Duża liczba czynników, często o charakterze losowym, wpływających na wypadkowy rozkład poziomu dźwięku hałasu środowiskowego w obszarze zurbanizowanym, a także wysoki poziom tła akustycznego ($L_{A0} \in (50-60) \text{ dB}$) sprawiają, że przeprowadzenie pełnego cyklu weryfikacji modelu propagacji dźwięku w przestrzeni zurbanizowanej jest niezwykle kosztownym i czasochłonnym przedsięwzięciem badawczym.

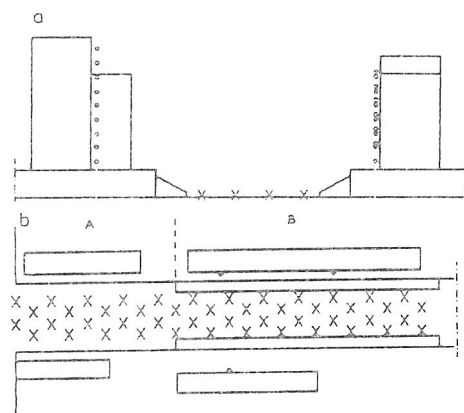
7.5. Analiza porównawcza metod modelowania

Analiza porównawcza wyników badań uzyskanych dla takich samych sytuacji na podstawie różnych metod jest jednym ze sposobów weryfikacji ich wiarygodności. Poniżej przedstawiono porównanie wyników badań uzyskanych na podstawie przedstawionego w pracy modelu oraz badań na makietach w skali z zastosowaniem różnych źródeł symulujących źródło hałasu: akustycznego (typu *air jet*) i optycznego, co wpływa na wierność odwzorowania w modelach rzeczywistych zjawisk akustycznych (patrz rozdz.1.2.). Wykorzystano tu wyniki badań akustycznych uzyskane przez Zakład Akustyki Instytutu Techniki Budowlanej (ITB) w Warszawie we współpracy z Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB) w Grenoble [161][169][170] oraz w Katedrze Akustyki UAM w Poznaniu [78] [171]. Obie metody badań modelowych wykorzystane zostały do modelowania hałasu ruchu drogowego w obszarze zurbanizowanym, przy czym pierwsze badania dotyczyły analizy akustycznej projektowanej Trasy Łazienkowskiej w Warszawie, natomiast drugie, mające charakter badawczy, stanowiły podstawę klasyfikacji akustycznej jakości akustycznej mini-wnętrz urbanistycznych [173][175].

Przedstawione przykłady pokazują także możliwości wykorzystania przedstawionego w pracy modelu w rozwiązywaniu zagadnień zarówno o charakterze badawczym, jak i z zakresu projektowania akustycznego.

7.5.1. Numeryczny model geometryczny - metoda akustyczna modelowania w skali. Analiza porównawcza

Analizę porównawczą prezentowanego w pracy numerycznego modelu geometrycznego i akustycznej metody modelowania w skali dokonano na przykładzie badań hałasu ruchu drogowego Trasy Łazienkowskiej (TL). Do badań porównawczych wybrano odcinek TL między ul. Marszałkowską i pl. Na Rozdrożu, dla którego wykonano zarówno badania modelowe na makiecie w skali, jak i pomiary terenowe po zrealizowaniu inwestycji [161][175]. Na odcinku tym TL przebiega w wykopie o jednakowym stopniu zagłębienia i ścianach pionowych pokrytych elementami betonowymi (rys.7.19 - odcinek A) lub ukośnych pokrytych zielenią (odcinek B). Zabudowa jest obustron-



Rys. 7.19. Model numeryczny odcinka Trasy Łazienkowskiej i otaczającej go zabudowy; a) przekrój poprzeczny, b) rzut poziomy
 Fig. 7.19. Numerical model of Łazienkowska Route and its surroundings; a) cross-section, b) plan

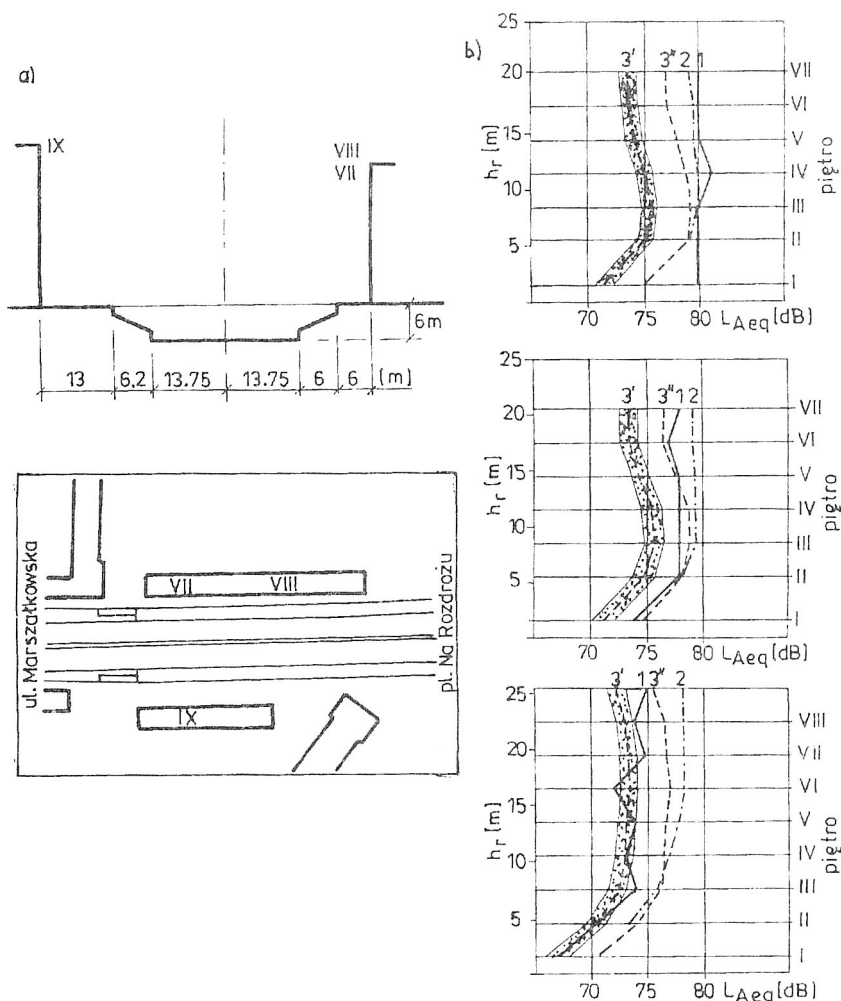
Tabela 7.2

Charakterystyki parametrów akustycznych modelu; współczynnik pochłaniania: α_1 - fasady budynków (tynk wapienny), α_2 - ściany pionowe wykopu (beton), m_0 - współczynnik pochłaniania w powietrzu dla $t=20^\circ$ i $H=70\%$

f_0 [hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α_1 [152]	0,16	0,18	0,20	0,24	0,26	0,30	0,36	0,40
α_2 [152]	0,01	0,01	0,014	0,016	0,017	0,018	0,02	0,02
m_0 [63] $\cdot 10^{-3}$	0,2	0,3	1,0	2,7	5,4	9,6	23	50

na, ciągła, wysoka [161]. Stosunkowo prosta geometria sytuacji urbanistycznej pozwala na skonstruowanie jej wiernego modelu zarówno na makiecie w skali, jak i w modelu numerycznym. Sprzyja to lepszej ocenie dokładności odwzorowania zjawisk akustycznych w porównywanych metodach modelowania. Porównywano wartości poziomu L_{AeqT} hałasu ruchu drogowego (w odległości 1m od elewacji budynków) wyznaczone w badaniach modelowych oraz zmierzone dla rzeczywistej sytuacji.

Badania modelowe wykonane zostały w Centrum Makietowym CSTB [170]. Model sytuacji urbanistycznej sporządzono w skali 1:100. Modele budynków wykonano w postaci gładkich prostopadłościanów ze spienionego polistyrenu, a odpowiednie właściwości akustyczne fasad uzyskano przez nakładanie farb. Źródłami dźwięku były źródła ultradźwiękowe pneumatyczne,



Rys. 7.20. Porównanie wyników badań modelowych i pomiarów - Trasa Łazienkowska; a) szkic sytuacji urbanistycznej (VII, VIII, IX - przekroje pomiarowe), b) rozkład L_{AeqT} na elewacji w funkcji wysokości h_r punktu obserwacji: 1 - pomiar wg [170][175], 2 - badania na makiecie wg [170][175], 3 - model numeryczny dla L_{WA} wg rozdz.5 (3') i L_{WA} jak dla makiety (3'')

Fig. 7.20. Comparison of the results of model investigations and measurements - Łazienkowska Route; a) sketch of the urban situation (VII, VIII, IX - measurement cross-sections), b) distribution of L_{AeqT} on the elevation as a function of height h_r of the observation point: 1 - measurement acc. to [164][169], 2 - investigations on the scale model acc. to [164][169], 3 - numeric model for L_{WA} acc. to chapter 5 (3') and L_{WA} as in scale model (3'')

emitujące dźwięk szerokopasmowy w zakresie od 10 kHz do 100 kHz. Dla przyjętej skali modelu odpowiada to rzeczywistemu zakresowi częstotliwości od 100 Hz do 1000 Hz.

Model numeryczny wybranego odcinka TL i otaczającej ją infrastruktury urbanistycznej skonstruowano zgodnie z zasadami sformułowanymi w rozdz.5 (model źródła hałasu) oraz w rozdz.7.1 (model przestrzeni zurbanizowanej). Widok numerycznego modelu badanej sytuacji urbanistycznej pokazano na rys.7.20. W tabeli 7.2 podano przyjęte w obliczeniach akustyczne parametry przestrzeni. Charakterystyki współczynników odbicia od powierzchni gruntu obliczono wg wzoru (7.2), przyjmując $\sigma=3000$ [w MKS] dla jezdni oraz $\sigma=400$ [w MKS] dla pozostałego terenu.

Poziom mocy akustycznej L_{WA} elementarnych źródeł dźwięku S_i wyznaczono na podstawie reguł (5.7)+(5.11) dla następujących parametrów ruchu drogowego, [169]:

- natężenie na głównych kierunkach ruchu $Q = 2000$ poj/h,
- procentowy udział pojazdów klasy ciężkiej $p_2 = 23\%$,
- średnia prędkość ruchu $V_1 = 90$ km/h i $V_2 = 80$ km/h.

Ze względu na sposób prowadzenia drogi oraz bliskie sąsiedztwo zabudowy w modelu numerycznym źródła hałasu przyjęto cztery zastępcze linie źródeł (rys.7.19).

Dla lepszego porównania dokładności odwzorowania warunków propagacji dźwięku w obu modelach wykonano także obliczenia poziomu L_{AeqT} dla takiego samego poziomu mocy akustycznej L_{WA} źródeł elementarnych, jak w badaniach na makiecie [170]. Stwierdzono bowiem, że w porównywanych badaniach modelowych ustalone dla tych samych parametrów ruchu poziomy mocy akustycznej L_{AW} , przypadające na odcinek drogi o długości $\delta l = 10$ m, różnią się o 3,5 dB⁸¹.

Przy przyjęciu takiej samej mocy akustycznej elementarnych źródeł dźwięku, analiza porównawcza wyników badań modelowych i pomiarów wskazuje na dużą zgodność wyników badań numerycznych i na makiecie w skali (por. krzywe 2 i 3'' - rys. 7.20). Dla wysokości punktów obserwacji $h_r < 15$ m różnice między prognozowanymi wartościami $L_{AeqT} \leq 1$ dB. Różnice te rosną ze wzrostem h_r aż do 2,5 dB dla $h_r = 25$ m. Uzyskane wyniki świadczą o zbliżonej dokładności odwzorowania warunków propagacji w obu modelach⁸². Z porównania krzywych 3' i 3'' wynika, że główną przyczyną rozbieżności między porównywanymi wynikami badań modelowych jest różnica w oszacowaniu mocy akustycznej źródła hałasu drogowego. Biorąc pod uwagę wnioski wynikające z weryfikacji modelu źródła hałasu drogowego (rozd.

⁸¹Por. wnioski w rozdz.5. - badania ITB-CSTB wykonano pod koniec lat 70.

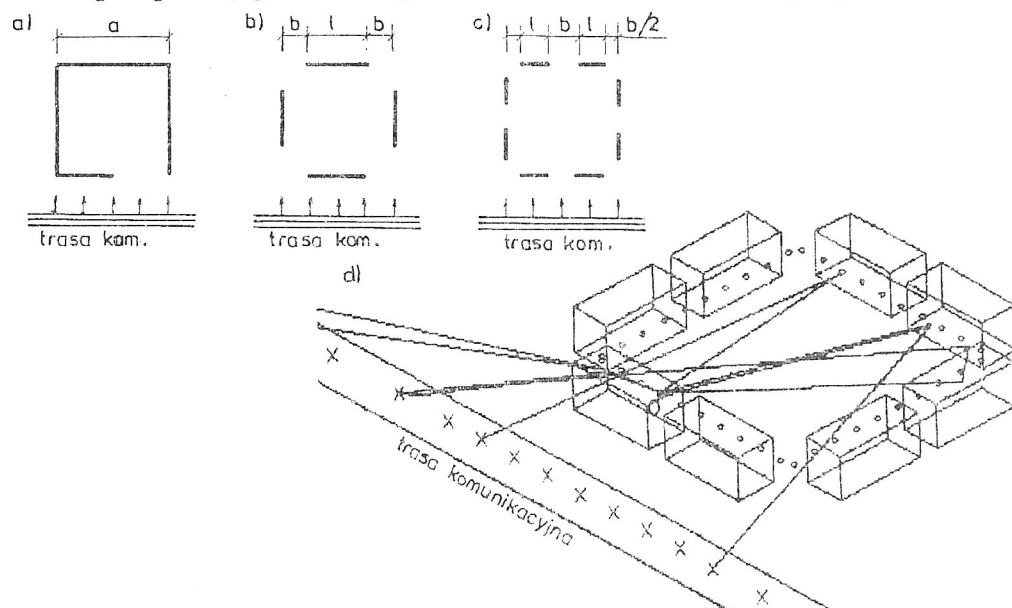
⁸²Dla badań na makiecie w skali brak wyników dla $h_r = 1,5$ m.

8.4) przyczynę tych różnic należy upatrywać w zmianie średniej mocy akustycznej pojazdów samochodowych w okresie 10 lat jakie dzieli porównywane badania. Wyniki te potwierdzają równocześnie konieczność aktualizacji parametrów empirycznych prezentowanych w pracy modeli teoretycznych.

Biorąc pod uwagę złożoność rzeczywistej sytuacji urbanistycznej tak pod względem układu przestrzennego jak i losowego charakteru źródła hałasu (patrz rozdz. 4.5) zgodność wyników badań modelowych i pomiarów należy uznać za zadowalającą.

7.5.2. Numeryczny model geometryczny - metoda optyczna modelowania w skali. Analiza porównawcza

Przedmiotem badań były miniwnętrza urbanistyczne o różnym charakterze obudowy, których schematy zostały opracowane przez Stawicką-Wałkowską w celu sporządzenia klasyfikacji akustycznej typowych wnętrz urbanistycznych (rys. 10.4 w [175]). Porównywano rozkłady poziomego hałasu



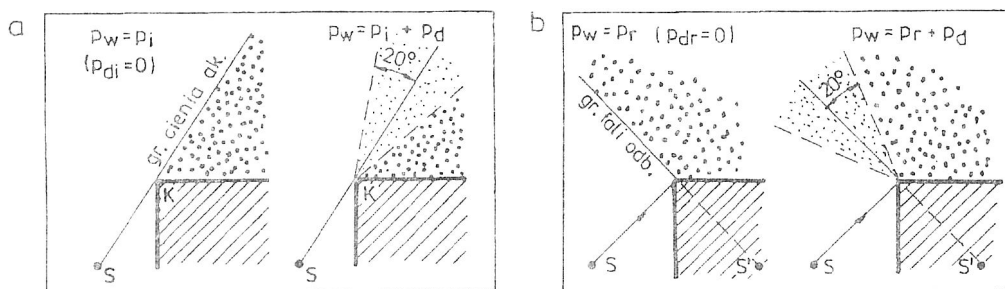
Rys. 7.21. Schematy badanych miniwnętrz urbanistycznych wg [175]; a) zabudowa częściowo otwarta, b) zabudowa przerywana, c) zabudowa luźna ($a=60$ m, $2b/l = 50$ i 75%), d) widok miniwnętrza wraz z wyznaczonymi dominującymi trasami promieni dźwiękowych dla punktu O, wg modelu numerycznego

Fig. 7.21. Schemes of the investigated urban interiors acc. to [175]; a) continuous housing partly open, b) housing with openings, c) detached housing ($a=60$ m, $2b/l = 50$ and 75%), d) view of the interior with determined dominating sound ray paths for point O, according to the numerical model

drogowego występującego na granicy wewnętrznej linii zabudowy. Uzyskano je na podstawie prezentowanego w pracy modelu numerycznego i metody optycznej modelowania w skali [78][171][175], ze szczególnym uwzględnieniem wpływu zjawiska dyfrakcji na bocznych krawędziach budynku. Schematy badanych wariantów sytuacji urbanistycznych oraz przykładowy widok numerycznego modelu miniwnętrza urbanistycznego o zabudowie luźnej pokazano na rys.7.21.

Analiza wpływu krawędzi uginającej na rozkład poziomu dźwięku hałasu drogowego we wnętrzach urbanistycznych

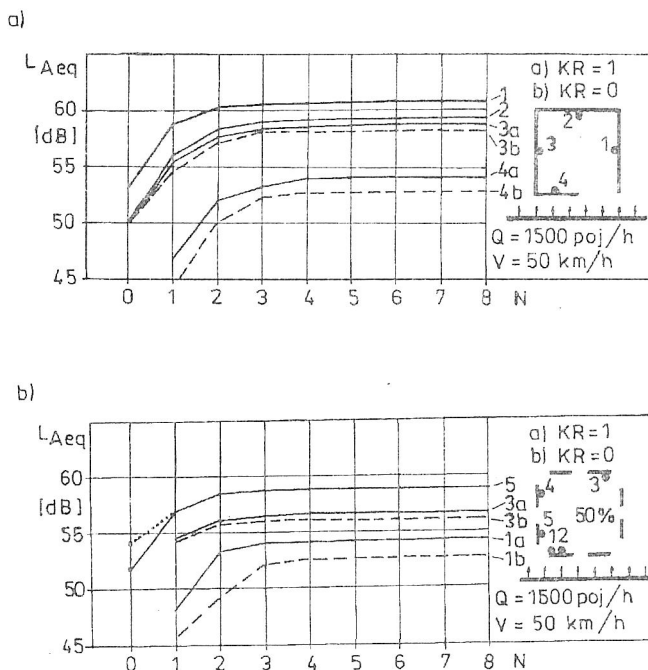
W modelach obliczeniowych propagacji dźwięku w obszarze zurbanizowanym przyjmowane jest często założenie o nieistotności wpływu fali dyfrakcyjnej na rozkład poziomu dźwięku hałasu środowiskowego. W przypadku propagacji dźwięku hałasu drogowego zakłada się zwykle, że ekranujący efekt budynków pierwszej linii zabudowy polega przede wszystkim na redukcji poziomu dźwięku bezpośredniego, w wyniku ograniczenia kąta widzenia odcinka drogi z danego punktu obserwacji [9][108][109][175][190].



Rys. 7.22. Graficzna ilustracja rozpraszającego wpływu krawędzi; a) na granicy cienia akustycznego fali bezpośredniej, b) na granicy cienia akustycznego fali odbitej

Fig. 7.22. Graphical illustration of the scattering influence of the edge; a) at the boundary of direct wave shadow, b) at the shadow boundary for the reflected wave

Z analizy rozkładu składowych pola akustycznego w otoczeniu krawędzi uginającej, przedstawionej w rozdz.6.4.1 wynika, że fala dyfrakcyjna występuje w całym obszarze wokół krawędzi, przy czym w obszarze fali bezpośredniej i odbitej ma ona charakter poprawki na straty energii tych fal w wyniku rozpraszającego oddziaływania krawędzi (patrz rys.6.6 i 6.7). Graficzną ilustrację tego zjawiska w odniesieniu do prostej sytuacji urbanistycznej pokazano na rys.7.22. W przypadku analizy propagacji dźwięku w obszarze luźnej zabudowy pominięcie wpływu bocznych krawędzi uginających może być przyczyną istotnego błędu modelowania.



Rys. 7.23. Zmiany L_{AeqT} hałasu drogowego w funkcji rzędu N obrazu pozornego dla różnego położenia punktu obserwacji w miniwnętrzu urbanistycznym; a) zabudowa ciągła, b) zabudowa luźna (50% obudowy): (—) — model pełny, (---) — z pominięciem fali ugiętej, (····) — z pominięciem wpływu krawędzi (dla $N=0$)

Fig. 7.23. Changes of L_{AeqT} of traffic noise as a function of the image order N for different positions of the observer in an urban interior; a) continuous housing, b) detached housing (50% of enclosure): (—) — complete model, (---) — diffracted wave not considered, (····) — influence of the edge not considered (for $N=0$)

W celu oszacowania tego efektu wykonano eksperymenty symulacyjne, w których analizowano wpływ dokładności odwzorowania zjawiska dyfrakcji na uzyskiwane wyniki obliczeń numerycznych rozkładu poziomu dźwięku L_{AeqT} hałasu ruchu drogowego w rozważanych miniwnętrzach urbanistycznych. W kolejnych eksperymentach numerycznych do modelu propagacji dźwięku (sformułowanego w rozdz.6) wprowadzano następujące założenia upraszczające:

1. Udział geometrycznych fal dyfrakcyjnych⁸³ (patrz rozdz.6.4) w wypadkowym polu akustycznym jest pomijalnie mały w porównaniu z udziałem fal bezpośrednich i fal odbitych. Uwzględnia się jednak rozpraszający wpływ krawędzi. Wypadkowe ciśnienie akustyczne w punkcie obser-

⁸³Fala dyfrakcyjna rozchodząca się w obszarze cienia akustycznego, która może ulec kolejnym odbiciom i ugięciom (patrz rozdz.6).

wacji jest w tym przypadku sumą ciśnień akustycznych fal bezpośrednich i fal odbitych pochodzących od wszystkich źródeł elementarnych S_{ij} , wyznaczonych z uwzględnieniem odpowiednich poprawek dyfrakcyjnych (rozdz. 6.4.4).

2. Wpływ fali dyfrakcyjnej na rozkład poziomu dźwięku we wnętrzu urbanistycznym jest pomijalny. W tym przypadku wypadkowe ciśnienie akustyczne w punkcie obserwacji jest sumą ciśnień akustycznych fal bezpośrednich od wszystkich źródeł elementarnych S_{ij} widzianych bezpośrednio z punktu obserwacji oraz fal odbitych⁸⁴ (rys.7.23 - linia kropkowana, $N = 0$).

Na podstawie analizy uzyskanych wyników (rys.7.23) stwierdzono, że wpływ geometrycznej fali dyfrakcyjnej daje się wyraźnie zauważyć tylko dla punktów obserwacji położonych w obszarze pełnego cienia akustycznego (dla wszystkich źródeł elementarnych S_i). Związany z tym błąd modelowania wynosi ok. 1,5 dB dla wnętrza urbanistycznego o charakterze pogłosowym (por. krzywe 4a i 4b - rys.7.23a) oraz od 1,5 dB do 2,5 dB dla wnętrza o zabudowie luźnej (por. krzywe 1a i 1b - rys.7.23b), przy czym poziom L_{AeqT} szacowany jest z niedomiarem. W przypadku wnętrza o zabudowie luźnej pominięcie rozpraszającego wpływu krawędzi uginającej może być przyczyną błędów obliczeń wynoszących (2,5+4) dB (krzywa 5 - por. linia kropkowana i ciągła dla $N=0$). W tym przypadku poziom L_{AeqT} szacowany jest z nadmiarem.

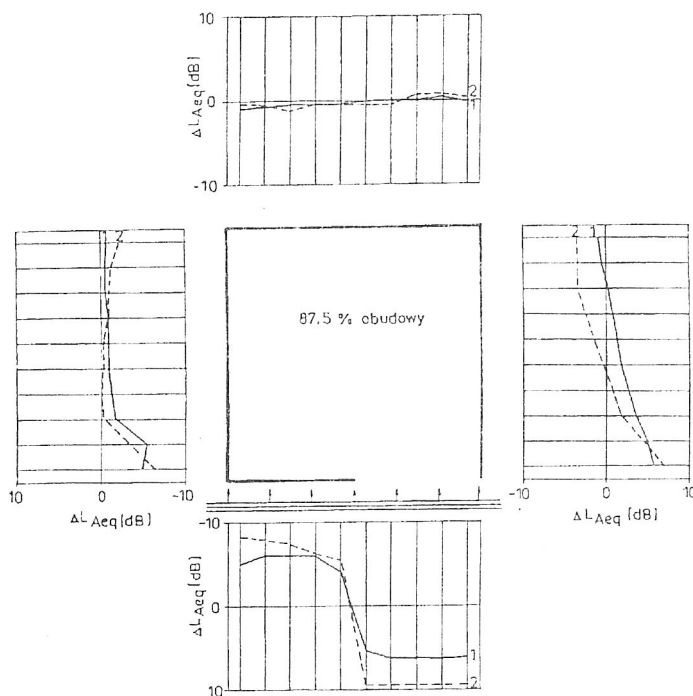
Wyniki analizy porównawczej modeli

Badania parametrów akustycznych wnętrz urbanistycznych optyczną metodą modelowania w skali wykonano w Katedrze Akustyki UAM w Poznaniu na modelu w skali 1:200 [78]. Elewacje modeli budynków pokryte zostały folią aluminiową, a odpowiednik asfaltowej powierzchni jezdni stanowił biały papier. W badaniach modelowych źródło hałasu drogowego zastąpione zostało źródłem światła, a mikrofon elementem światłoczułym. Ze względu na charakterystykę widmową źródła optycznego, w modelu tym nie jest odwzorowywany efekt zjawiska ugięcia fal dźwiękowych na krawędziach przeszkody.

W modelu numerycznym, skonstruowanym dla takich samych sytuacji urbanistycznych jak w modelu optycznym, przyjęto następujące parametry akustyczne przestrzeni: fasady budynków: α_1 wg tab.7.2, jezdnie: $\sigma=3000$ [w MKS], powierzchnia gruntu: $\sigma=400$ [w MKS]. Na podstawie wykresu z rys. 7.23 do obliczeń przyjęto $N_{opt}=5$.

Przykładowe porównanie wyników uzyskanych na podstawie prezentowanego w pracy modelu i optyczną metodą modelowania w skali pokazano na

⁸⁴Ze względów technicznych w tym przypadku obliczenia wykonano tylko dla $N=0$.

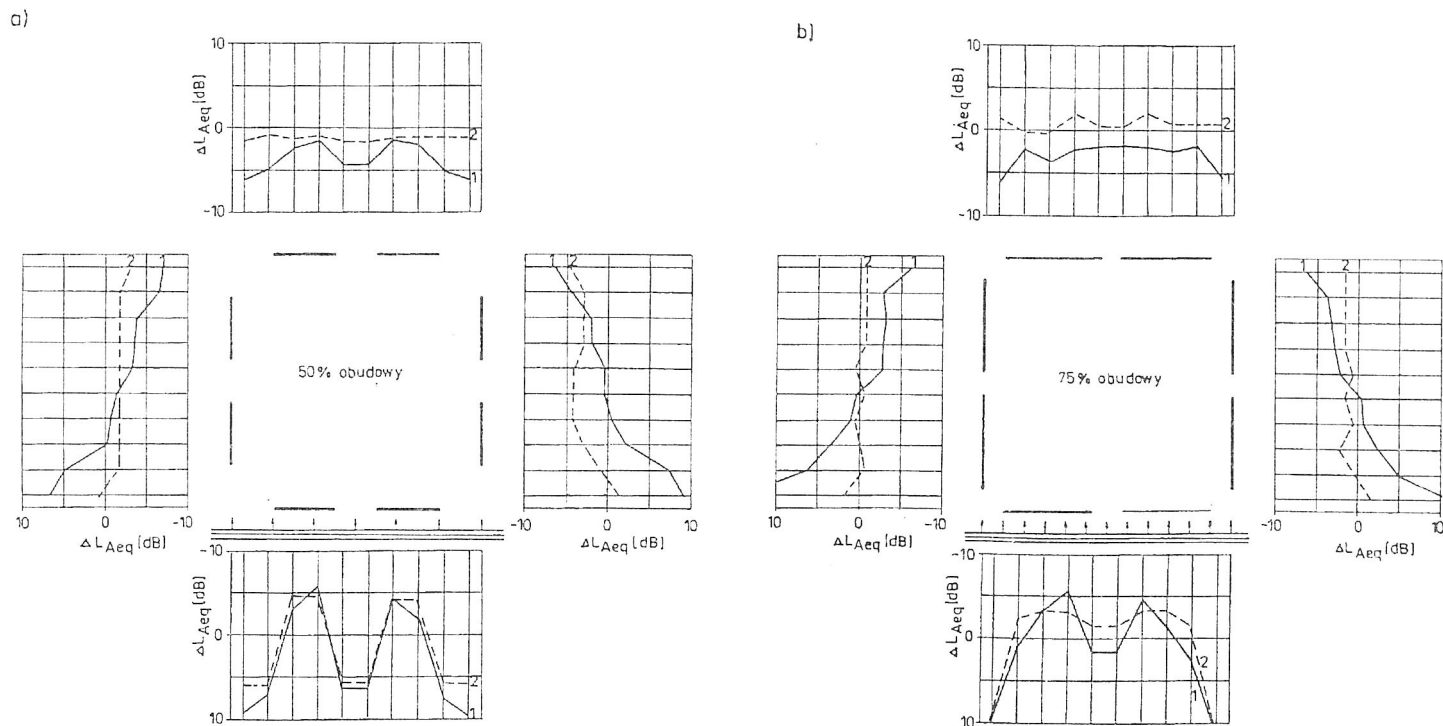


Rys. 7.24. Porównanie rozkładów L_{AeqT} hałasu drogowego występującego w odległości 1 m od wewnętrznej elewacji miniwnętrza urbanistycznego o zabudowie częściowo otwartej (bok $a=60$ m, 87,5% obudowy): 1 - model numeryczny, 2 - model optyczny [171]

Fig. 7.24. Comparison of L_{AeqT} distribution for traffic noise occurring at a distance of 1 m from the inner elevation of the urban interior of a continuous housing, partly open (side length $a=60$ m, 87,5% of enclosure): 1 - numerical model, 2 - optical scale model [171]

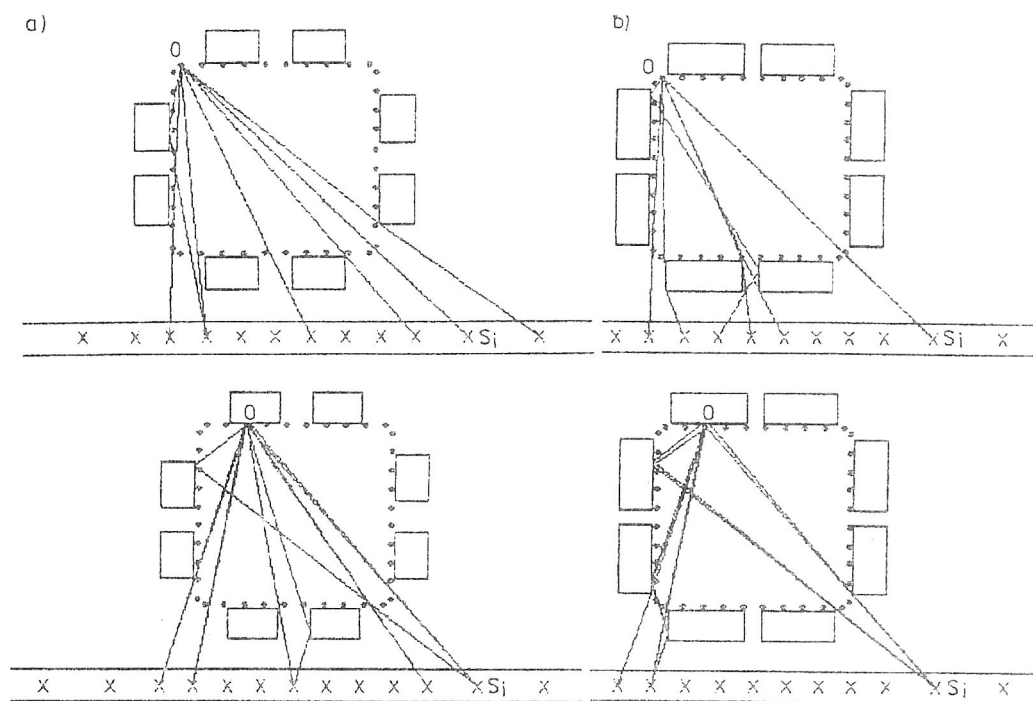
rys. 7.24 dla zabudowy ciągłej częściowo otwartej oraz na rys.7.25 dla różnych wariantów zabudowy luźnej⁸⁵. Można stwierdzić, że wprawdzie ogólny charakter zmian przewidywanego poziomu dźwięku hałasu jest podobny, jednak zwracają uwagę różnice, których występowanie można uzasadnić niewłaściwym odwzorowaniem zjawiska ugięcia w metodzie optycznej. Dla miniwnętrza z zabudową zwartą ciągłą największe różnice występują dla całkowicie ekranowanej elewacji (ok. 5 dB), a dla miniwnętrza o zabudowie luźnej w obszarach rozpraszającego oddziaływania krawędzi uginających ($2+8$ dB). Jak można było oczekiwać większe różnice obserwuje

⁸⁵W celu umożliwienia porównania charakteru zmian L_{AeqT} wzdłuż elewacji na rysunkach pokazano rozkłady wartości $\Delta L_{Aeq} = (L_{AeqT} - \bar{L}_{AeqT})$, gdzie $\bar{L}_{AeqT}$ oznacza wartość średnią dla badanej linii zabudowy.



Rys. 7.25. Porównanie rozkładów L_{AeqT} hałasu drogowego występującego w odległości 1m od wewnętrznej elewacji miniwnętrza urbanistycznego o zabudowie luźnej; a) 50% obudowy, b) 75% obudowy: 1 - model geometryczny, 2 - model optyczny [171]

Fig. 7.25. Comparison of L_{Aeq} distribution for traffic noise occurring at a distance of 1 m from the inner elevation of the urban interior of a detached housing: a) 50% of enclosure, d) 75% of enclosure, 1 - geometrical model, 2 - optical scale model [165]



Rys. 7.26. Dominujące trasy promieni dźwiękowych hałasu drogowego docierających do punktu obserwacji O - miniwnętrze urbanistyczne o zabudowie luźnej; a) 50% obudowy, b) 75% obudowy (x - źródło dźwięku S_1)

Fig. 7.26. Dominating sound ray paths of traffic noise reaching the observation point O - urban interior of a detached housing; a) 50% of enclosure, b) 75% of enclosure (x - sound source S_1)

się dla 75-procentowej obudowy wnętrza. Jest to skutkiem silniejszego wpływu rozpraszania przez krawędzie boczne budynków (por rys.7.25a i 7.25b). Potwierdzają to wyniki analizy dominujących tras promieni dźwięku wyznaczonych dla tych samych punktów obserwacji przy 50- i 75-procentowej obudowie wnętrza, które pokazano na rys.7.26a i b. W drugim przypadku wszystkie trasy promieni dźwiękowych, które docierają do punktu obserwacji przebiegają w obszarze rozpraszającego oddziaływania krawędzi.

7.6. Przykłady wykorzystania modelu

7.6.1. Zastosowanie geometrycznego modelu propagacji do analizy skuteczności bariery akustycznej umieszczonej na powierzchni odbijającej

Ekran akustyczny jest często stosowanym środkiem ochrony przeciwhałasowej. Redukcja poziomu dźwięku za ekranem umieszczonym na powierzchni gruntu zależy nie tylko od geometrii układu: źródło S - ekran - punkt O , lecz także od właściwości pochłaniających podłoża, na którym umieszczono barierę. Zagadnieniem tym zajmowali się m.in. Jonasson [71], De Jong [24], Hayek [49].

Podstawowym parametrem charakteryzującym ekran akustyczny jest tłumienność wtrąceniowa, nazywana często skutecznością ekranowania ΔL_e . Zdefiniowana jest ona jako różnica poziomów ciśnienia akustycznego występującego w punkcie obserwacji przed oraz po zastosowaniu bariery akustycznej. Jak już powiedziano w rozdz.6.1, znane z literatury zależności określające skuteczność ekranowania ΔL_e^o słuszne są dla teoretycznego przypadku nieskończonego długiego ekranu umieszczonego w przestrzeni swobodnej, gdzie w obszarze cienia akustycznego występuje tylko fala dyfrakcyjna (rozdz.6.4) [32][42][58][75][76][81][101]. Do najbardziej znanych metod szacowania skuteczności ekranowania należy półempiryczna zależność podana przez Maekawę, w której skuteczność ekranu cienkiego dla punktowego źródła dźwięku wyznaczana jest w funkcji liczby Fresnela N [101]. Podobną zależność podali Kurze i Anderson dla linii niekoherentnych źródeł punktowych [81].

Sformułowany w rozdz.6 i 7.1 model propagacji fali akustycznej stanowi dobrą podstawę do analizy skuteczności ekranów akustycznych o różnych kształtach z uwzględnieniem wpływu właściwości pochłaniających podłoża, na którym zostały usytuowane.

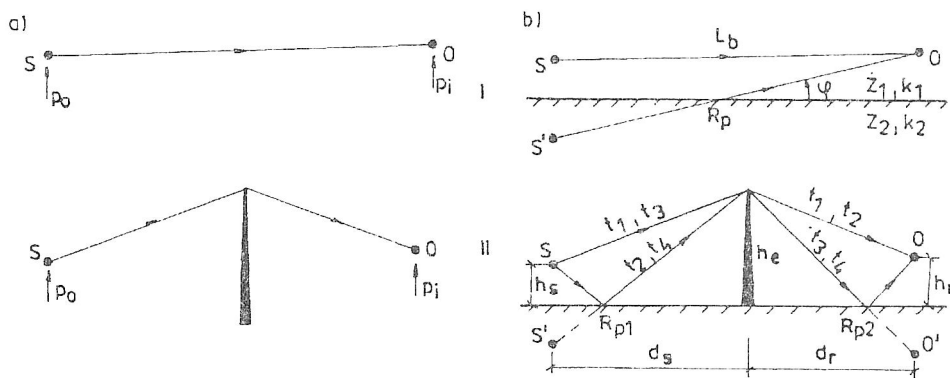
Wychodząc z definicji skuteczności ekranowania ΔL_e oraz definicji transmitancji ciśnieniowej T_p (def.6.1), dla sytuacji jak na rys.7.27a otrzymujemy następujące wyrażenia na skuteczność ekranowania w przestrzeni swobodnej ΔL_e^o [140]:

$$-\Delta L_e^o = 10 \lg |p_d/p_i|^2 = 20 \lg |T_{pd}| - 20 \lg |T_{pi}|, \quad (7.18)$$

gdzie:

p_d, p_i - ciśnienie odpowiednio fali dyfrakcyjnej i bezpośredniej,
 T_{pd}, T_{pi} - transmitancja ciśnieniowa trasy odpowiednio dla promienia ugiętego oraz bezpośredniego, wg (6.6).

Rozważmy teraz przypadek, gdy nieskończonego długo ekran umieszczony jest na powierzchni gruntu, co na ogół zachodzi w realnych sytuacjach. Z



Rys. 7.27. Geometria układu: źródło S - krawędź K - punkt obserwacji O, oraz trasy (t_i) promieni dźwiękowych: a) ekran w przestrzeni swobodnej, b) ekran na powierzchni odbijającej

Fig. 7.27. Geometry of source S - edge K - observation point O and sound ray paths (t_i): a) a thin barrier in open space, b) a thin barrier on the reflecting surface

analizy geometrycznej możliwych tras promieni dźwiękowych wynika, że do punktu obserwacji za ekranem dociera fala ugięta na krawędzi ekranu (jak w warunkach przestrzeni swobodnej) oraz fale ugięte i odbite od powierzchni gruntu zarówno po stronie źródła, jak i odbiornika, jak pokazano na rys.7.27b. Natomiast dla sytuacji odniesienia (bez ekranu) do punktu obserwacji dociera fala bezpośrednia oraz odbita od powierzchni gruntu. W tym przypadku po uwzględnieniu def.(6.1÷6.3), skuteczność ekranowania ΔL_e^r wynosi [140]:

$$\Delta L_e^r = 10 \lg \left| \left(\sum_{j=1}^4 p_{dj} \right) / (p_i + p_r) \right|^2 = 10 \lg |\mathbb{T}_{pw,e}^2| - 10 \lg |\mathbb{T}_{pw,o}^2|, \quad (7.19)$$

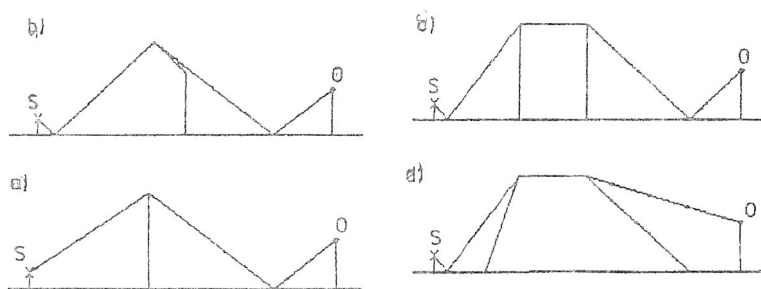
gdzie:

p_{dj} - ciśnienie fali docierającej j-tą trasą (rys.7.27b-II),

p_i, p_r - ciśnienie odpowiednio fali bezpośredniej i odbitej (rys.7.27a-I),

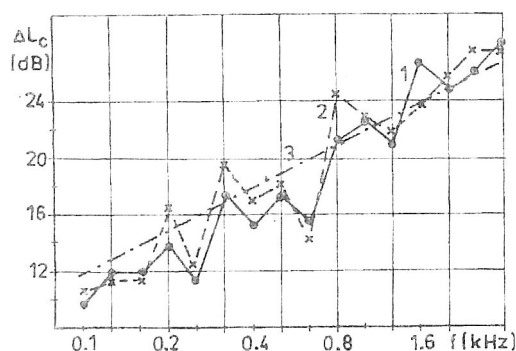
$\mathbb{T}_{pw,e}, \mathbb{T}_{pw,o}$ - wypadkowa transmitancja ciśnieniowa wg (6.2a) i (6.6) odpowiednio dla sytuacji po oraz przed zastosowaniem ekranu.

Na podstawie wzorów (6.2a) i (6.3) wielkość $\mathbb{T}_p^2$ dana jest zależnością (6.29). Na rys.7.28 pokazano przykładowo wyznaczone (wg modelu numerycznego) trasy promieni dźwiękowych dla różnych typów ekranów akustycznych, a na rys.7.29 wyniki analizy wpływu właściwości powierzchni gruntu na przebieg charakterystyki skuteczności ekranowania ΔL_e^r w funkcji często-



Rys. 7.28. Przykładowe trasy promieni dźwiękowych wyznaczone wg modelu numerycznego dla różnego typu ekranów akustycznych: a) ekran cienki, b) ekran typu L odwrócone, c) i d) bariera gruba o przekroju prostokątnym i trapezoidalnym

Fig. 7.28. Exemplary paths of sound rays determined according to the numerical model for different kinds of acoustic barriers; a) thin barrier, b) L-shape barrier, c) and d) thick barrier of a rectangular and trapezoidal section



Rys. 7.29. Porównanie charakterystyk skuteczności ekranu akustycznego, obliczonych w tercjowych pasmach częstotliwości: 1 i 2 - ekran na powierzchni gruntu, wg (7.19) dla $\sigma=150$ i $\sigma=30000$ [w cgs], 3 - w przestrzeni swobodnej wg (7.18) [140]; a) $h_c=6$ m, b) $h_s=1$ m, $h_r=1,5$ m, $d_s=10$ m, $d_r=10$ m (jak na rys.7.27)

Fig. 7.29. Comparison of 1/3 octave band characteristics of barrier efficiency calculated: 1 and 2 - acc. to (7.19) for the barrier over the ground for $\sigma=150$ and $\sigma=30000$ [cgs units]; 3 - for open space acc. to (7.18)

tliwości f_0 . Obliczenia wykonano dla pasm szumu o szerokości tercji (patrz rozdz.6.5)).

Na podstawie analizy skuteczności ekranowania uzyskanych wg (7.18) i (7.19) można sformułować następujące wnioski [140]:

1. Zjawisko interferencji, które występuje w wyniku nakładania się fali ugiętej oraz fal ugiętych i odbitych od powierzchni gruntu, powoduje silne zróżnicowanie częstotliwościowej charakterystyki skuteczności eka-

nowania ΔL_e . Ze wzrostem szerokości pasma częstotliwości sygnału maleje głębokość minimów i maksimów interferencyjnych. Dla szumu o szerokości pasma równej jednej trzeciej różnice wynoszą (3+8)dB w zależności od typu powierzchni oraz geometrii układu. Ponieważ zjawisko interferencji występuje zarówno dla sytuacji odniesienia bez ekranu, jak i w obecności ekranu, efekty interferencyjne mogą się sumować lub kompensować.

2. W przypadku pominięcia efektów związanych z interferencją fal zmiany skuteczności ekranowania w zależności od właściwości pochłaniających podłoża nie przekraczają 2 dB (patrz także rozdz.8.5).

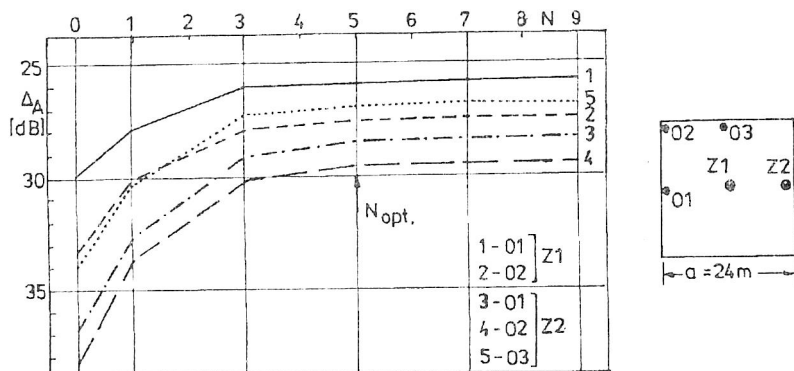
7.6.2. Analiza wpływu interferencji na rozkład poziomu ciśnienia akustycznego w miniwnętrzach urbanistycznych

Hałas wewnątrzsiedlowy jest jednym z czynników decydujących o jakości akustycznej wewnątrz urbanistycznych [175]. W przypadku zespołów urbanistycznych o wydzielonych wnętrzach, wypadkowy hałas wewnątrzsiedlowy jest wynikiem nakładania się fali bezpośredniej i fal odbitych od powierzchni gruntu oraz fasad budynków. Należy się zatem liczyć z możliwością występowania lokalnych wzmocnień lub osłabień poziomu ciśnienia akustycznego w wyniku zjawiska interferencji, zwłaszcza w małych wnętrzach o zabudowie ciągłej. W metodach obliczeniowych klimatu akustycznego w obszarze zurbanizowanym pomija się zwykle wpływ tego zjawiska, gdyż wielkością obliczaną jest kwadrat wypadkowego ciśnienia akustycznego rozważany jako suma kwadratów ciśnień składowych [106][108][161].

Dla oceny wpływu zjawiska interferencji we wnętrzach urbanistycznych wykonano eksperymenty numeryczne, w których badano rozkłady poziomu L_{pk} ciśnienia akustycznego w pasmach oktaowych o częstotliwości środkowej f_o z zakresu (63+8000)Hz (w odległości 1 m od elewacji miniwnętrza o zabudowie zwartej ciągłej). Sposób uwzględnienia w prezentowanym w pracy modelu zjawiska interferencji omówiono w rozdz.6.5. Obliczenia wykonano dla punktowego wszechkierunkowego źródła dźwięku umieszczonego w środku geometrycznym miniwnętrza (Z1) oraz w połowie długości jego boku w odległości $d_s=0,1$ m od elewacji (Z2). W obu przypadkach wysokość źródła wynosiła $h_s=1,5$ m. Zbadano równocześnie wpływ charakterystyki widmowej źródła dźwięku na rozkład poziomu dźwięku L_A . Przyjęto trzy różne charakterystyki widmowe poziomu mocy akustycznej źródła hałasu:

- linową w całym zakresie częstotliwości - (oznaczoną UDS1),
- niskoczęstotliwościową o nachyleniu -3 dB/okt. (f_o) - (LFS1),
- wysokoczęstotliwościową o nachyleniu +3 dB/okt. (f_o) - (HFS1).

Pozostałe parametry akustyczne modelu przyjęto jak w tabeli 7.2.



Rys. 7.30. Zmiany unormowanego poziomu dźwięku $\Delta L_A = L_A - L_{WA}$ w funkcji rzędu N obrazu pozornego, wyznaczone dla miniwnętrza urbanistycznego o zabudowie ciągłej i boku $a=24$ m (L_{WA} - poziom skorygowanej mocy akustycznej źródła)

Fig. 7.30. Changes of normalized sound level $\Delta L_A = L_A - L_{WA}$ as a function of image order N determined for the urban interior of a continuous housing and side length $a=24$ m (L_{WA} - A-weighted acoustic power level)

Na podstawie analizy błędu modelu, której wyniki pokazano na rysunku 7.30, ustalono $N_{opt} = 5$. Z wykresu tego widać także, że w wyniku wielokrotnych odbić poziom dźwięku hałasu wewnątrzsiedlowego wzrasta o (4+9) dB, w zależności od usytuowania źródła. Jest to zgodne z wartościami podawanymi w [161] i [175].

Przykładowe wyniki obliczeń uzyskane dla przestrzeni otwartej oraz miniwnętrza zamkniętego (100% obudowy) pokazano na rys. 7.31 oraz 7.32 i 7.33. Na rysunkach tych wykreślono wartości ΔL i ΔL_A unormowane następująco względem poziomu mocy akustycznej źródła:

$$\Delta L = L_{pk} - L_{wk}$$

oraz

$$\Delta L_A = L_A - L_{WA}$$

gdzie:

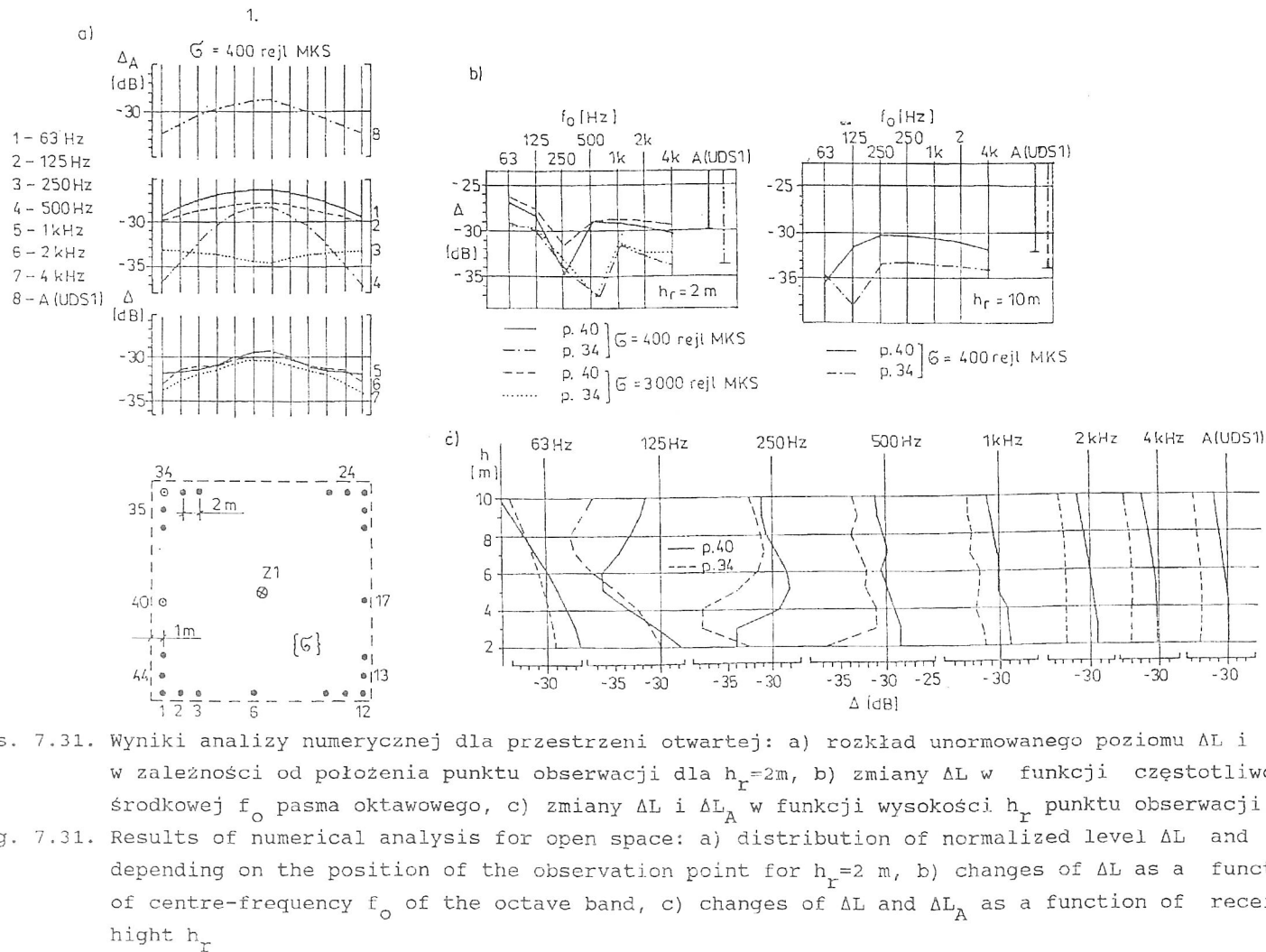
L_{pk} - poziom ciśnienia akustycznego w k -tym pasmie oktawowym,

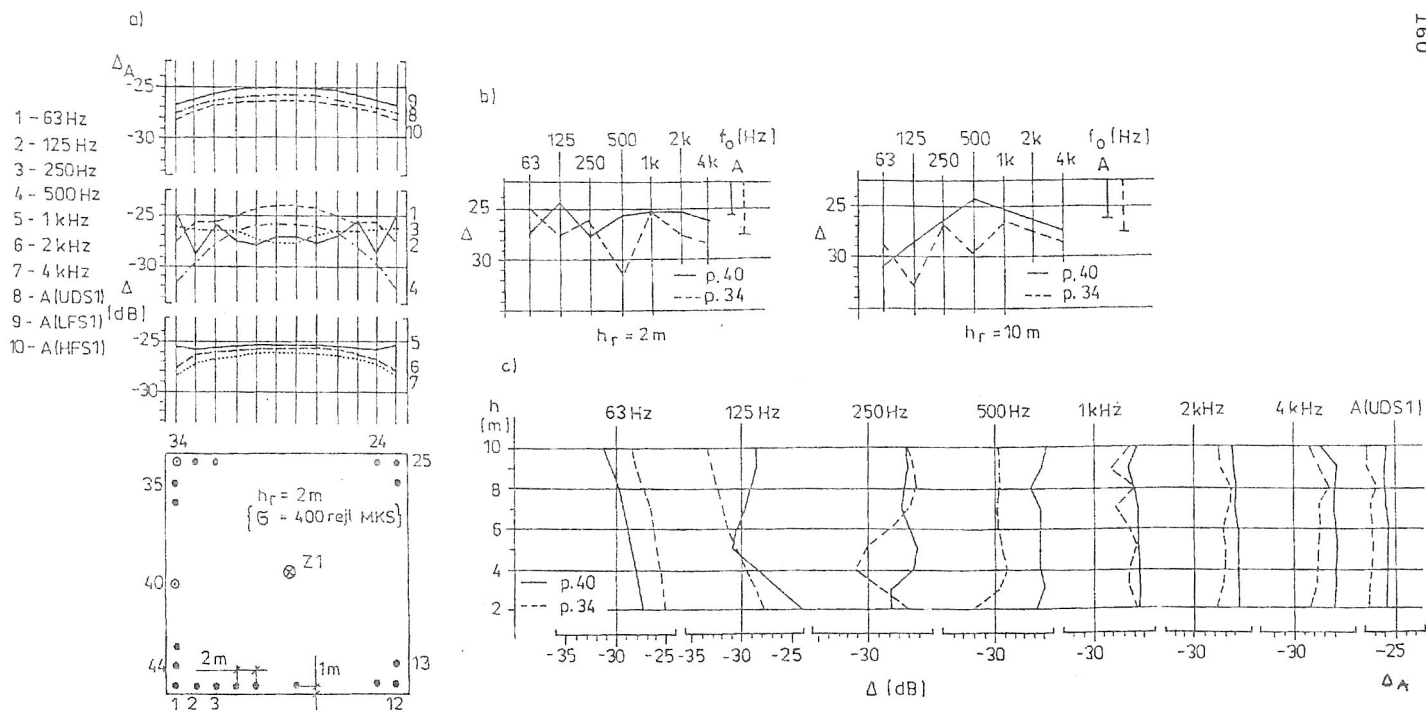
L_{wk} - poziom mocy akustycznej w k -tym pasmie oktawowym,

L_A - skorygowany poziom dźwięku,

L_{WA} - skorygowany poziom mocy akustycznej.

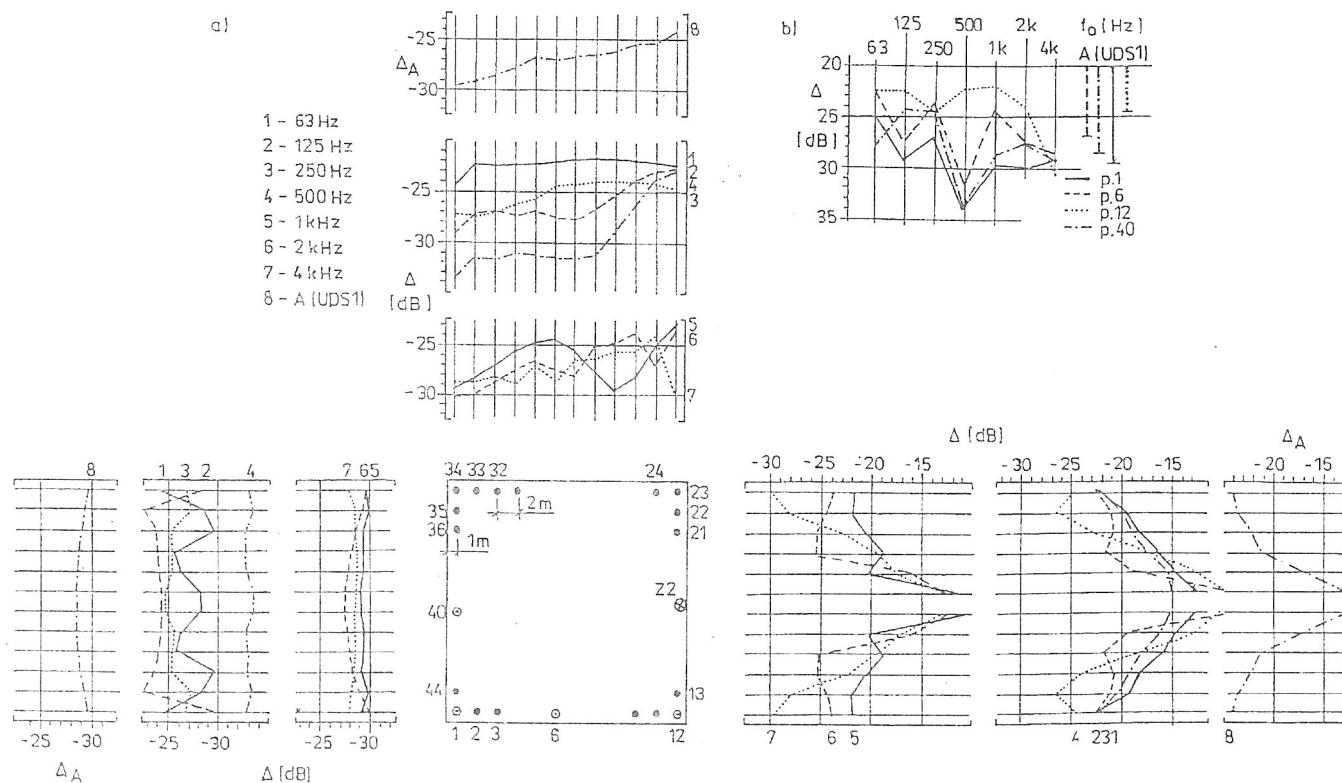
Jak wykazują wyniki obliczeń, efekt zjawiska interferencji występuje wyraźnie w pasmach o $f_0 = 125, 250$ i 500 Hz, dla których





Rys. 7.32. Wyniki analizy numerycznej dla zamkniętego miniwnętrza urbanistycznego o boku $a=24$ m - źródło dźwięku Z1 usytuowane centralnie: a) rozkład ΔL i ΔL_A w odległości 1 m od elewacji dla $h_r=2$ m (ΔL_A obliczone dla różnych charakterystyk widmowych źródła), b) zmiany ΔL w funkcji częstotliwości środkowej f_0 pasma oktawowego, c) zmiany ΔL i ΔL_A w funkcji wysokości h_r punktu obserwacji

Fig. 7.32. Results of numerical analysis for the closed urban interior of side length $a=24$ m - sound source (Z1) situated centrally: a) distribution of normalized level ΔL and ΔL_A at a distance of 1 m from the elevation for $h_r=2$ m (ΔL_A calculated for different spectrum of source), b) changes of ΔL as a function of octave band centre-frequency f_0 , c) changes of ΔL and ΔL_A as a function of receiver height h_r



Rys. 7.33. Wyniki analizy numerycznej dla zamkniętego miniwnętrza urbanistycznego o boku $a=24\text{m}$ - źródło dźwięku Z2 usytuowane przy elewacji: a) rozkład unormowanego poziomu ΔL i ΔL_A w odległości 1m od elewacji dla $h_r=2\text{m}$, b) zmiany ΔL w funkcji częstotliwości środkowej f_0 pasma okt.

Fig. 7.33. Results of numerical analysis for the closed urban interior of side length $a=24\text{ m}$ - sound source (Z2) situated next to the elevation: a) distribution of normalized level ΔL and ΔL_A for $h_r=2\text{ m}$, b) changes of ΔL as a function of octave band centre-frequency f_0

głębokość minimum interferencyjnego wynosi (5 ± 8) dB, a maksimum do 3 dB (patrz wykresy (b) i (c) na rys. 7.31 i 7.32). Dla pasm oktaowych o $f_0 \geq 1$ kHz efekt interferencji jest pomijalnie mały (zmiany ok. 1 dB dla wnętrza całkowicie obudowanego), podobnie jak dla skorygowanego poziomu dźwięku L_A . Dla przestrzeni otwartej i $h_r = 2$ m (rys. 7.31b i c) można zauważyć minimum w paśmie o $f_0 = 500$ Hz charakterystyczne dla propagacji fali akustycznej nad powierzchnią gruntu [3]. W rozpatrywanym zakresie odległości między źródłem dźwięku i punktem obserwacji ($d \leq 60$ m), wpływ właściwości pochłaniających powierzchni gruntu na wartość poziomu dźwięku jest niewielki, co jest zgodne z przewidywaniem. Dają się natomiast zauważyć zmiany głębokości minimów interferencyjnych wraz ze zmianą wartości parametru σ (rys. 7.31b).

Wpływ charakterystyki częstotliwościowej źródła dźwięku na poziom dźwięku L_A ilustruje rys. 7.32a. Uzyskane wyniki wskazują, że dla hałasu szerokopasmowego charakter zmian poziomu L_A wzdłuż elewacji miniwnętrza zależy w niewielkim stopniu od charakterystyki widmowej źródła hałasu (por. krzywe 8, 9 i 10 na rys. 7.32). Jak można było oczekiwać największe wartości L_A uzyskano dla źródła o charakterystyce niskoczęstotliwościowej (krzywa 9), a najmniejsze dla źródła o charakterystyce wysokoczęstotliwościowej (krzywa 10), jednak różnice między tymi wartościami nie przekraczają 2 dB.

7.7. Uwagi końcowe

Przedstawiona w niniejszym rozdziale koncepcja modelowania jest próbą kompleksowego rozwiązania problemu prognozowania klimatu akustycznego w złożonych układach urbanistycznych.

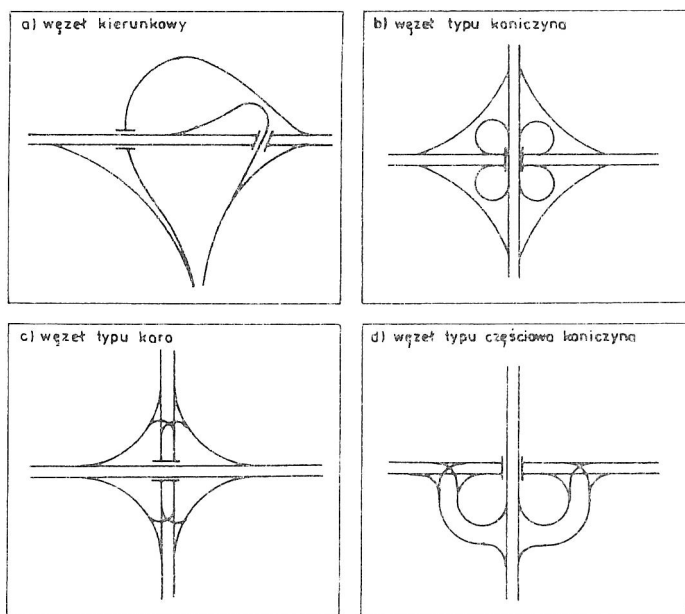
Przez syntezę modeli źródła hałasu środowiskowego (rozdz. 4 i 5) oraz modelu propagacji w przestrzeni zurbanizowanej, uzyskano metodę prognozowania hałasu drogowego w środowisku zurbanizowanym. Metoda ta może znaleźć powszechne zastosowanie w rozwiązywaniu problemów o charakterze badawczym, a także w zastosowaniach praktycznych z zakresu ochrony środowiska, np. w ocenie oddziaływania na środowisko nowo projektowanych układów komunikacyjnych, ocenie jakości akustycznej wnętrza urbanistycznych czy skuteczności ekranów akustycznych itp.

8. ZASTOSOWANIE MODELI EMISJI I PROPAGACJI DO PROGNOZOWANIA HAŁASU WIELOPOZIOMOWYCH WĘZŁÓW DROGOWYCH

8.1. Wprowadzenie

W dotychczasowych rozważaniach dotyczących modelowania źródeł hałasu środowiskowego zakładano (rozdz.3-5), że elementarne źródło dźwięku znajduje się na odbijającej powierzchni, a warunki propagacji na obszarze ZHŚ odpowiadają warunkom przestrzeni otwartej. Wielopoziomowy węzeł drogowy (WWD), rozpatrywany jako źródło hałasu środowiskowego, jest skomplikowanym układem przeplatających się strumieni punktowych źródeł dźwięku, które poruszają się w złożonym układzie przestrzennym (rys.8.1). W tym przypadku model przestrzeni otwartej dla obszaru ZHŚ jest nieadekwatny, zachodzi konieczność uwzględnienia zjawiska odbicia i ekranowania na obiektach przestrzennych tworzących WWD.

W przedstawionej koncepcji modelowania WWD rozpatrywany jest jako zbiór jednorodnych, pod względem warunków emisji i propagacji dźwięku, segmentów węzła (SW), które z kolei są rozważane jako niezależne ZHŚ. Do identyfikacji parametrów elementarnych źródeł dźwięku wykorzystuje się reguły stacjonarnego modelu hałasu drogowego sformułowanego w rozdz.5, a



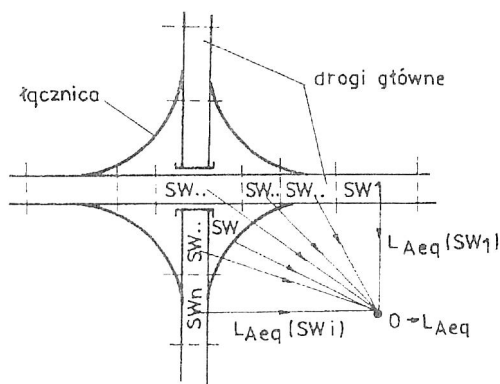
Rys. 8.1. Schematy podstawowych typów węzłów drogowych
Fig. 8.1. Diagrams of basic types of cross-roads

do opisu warunków propagacji geometryczny model propagacji dźwięku w trójwymiarowej przestrzeni ograniczonej sformułowany w rozdz.6 oraz rozwinięty w rozdz.7. W dalszych rozdziałach przedstawiono założenia, regułę generalną modelu i wyniki weryfikacji doświadczalnej. Szczegółowe wyniki badań⁸⁶ zawarte zostały w [142/II][143] oraz [146][147][148].

8.2. Założenia i struktura modelu hałasu WWD

Założenia modelu emisji hałasu z obszaru (WWD) wynikające z przyjętej koncepcji ogólnej modelowania ZHS (rozdz.3.3) oraz definicji (3.8) i (3.9) (rozdz.3.4.2) są następujące:

- Z8.1. WWD jako źródło hałasu rozpatruje się jako zbiór niezależnych segmentów węzła SW (def.8.1, rys.8.2).
- Z8.2. Każdy segment węzła SW jest niezależnym, powierzchniowym źródłem hałasu środowiskowego (def.3.1).
- Z8.3. Modelem źródła hałasu dla SW jest stacjonarny model hałasu arterii komunikacyjnej, przedstawiony w rozdz.5.
- Z8.4. Warunki propagacji dźwięku między elementarnym źródłem S (def.3.9) a punktem obserwacji O opisuje funkcja propagacji $F(S,O)$ (def.3.7), wyznaczona na podstawie reguł sformułowanych w rozdz.6,



Rys. 8.2. Przykład podziału dwupoziomowego węzła drogowego na segmenty
Fig. 8.2. Example of the division of a two-level crossing into segments

⁸⁶ Badania prowadzono w ramach CPBR 11.4 kierunek III Ochrona środowiska przed hałasem i wibracjami. Wyniki analizy teoretycznej oraz badań empirycznych i modelowych stanowiły podstawę do opracowania metody prognozowania hałasu w otoczeniu WWD, która wchodzi w skład Instrukcji ITB nr 311 Metoda prognozowania hałasu emitowanego z obszaru dużych źródeł powierzchniowych.

z uwzględnieniem następujących zjawisk elementarnych: geometrycznego rozprzestrzeniania się fali akustycznej, odbicia, ugięcia i pochłaniania w powietrzu.

- Z8.5. Poziom ciśnienia akustycznego, pochodzący od segmentu węzła (SW) jest wyznaczany z zasady superpozycji kwadratów ciśnień akustycznych pochodzących od wszystkich źródeł elementarnych S znajdujących się na obszarze SW.
- Z8.6. Wypadkowy poziom ciśnienia akustycznego w punkcie obserwacji jest wyznaczany z zasady superpozycji kwadratów ciśnień akustycznych pochodzących od segmentów węzła widzianych⁸⁷ bezpośrednio z danego punktu obserwacji.
- Z8.7. Obliczenia wykonywane są w oktawowych pasmach częstotliwości a wypadkowy skorygowany zgodnie z krzywą A, poziom dźwięku wyznacza się z jego definicji.

Segment węzła zdefiniowany został następująco:

def.8.1: Segmentem węzła drogowego SW jest prostoliniowy odcinek drogi charakteryzujący się stałymi warunkami ruchu oraz jednorodnymi warunkami propagacji dźwięku do otoczenia (ZG3 roz.3.3.1), przy czym:

- a) ze względu na warunki ruchu wydziela się dwie klasy:
 - drogi główne,
 - drogi łącznikowe,
- b) ze względu na warunki propagacji dźwięku do otoczenia wyróżnia się następujące typy:
 - drogi poziome w płaszczyźnie terenu,
 - drogi poziome na estakadzie,
 - drogi poziome w wykopie,
 - podjazdy (zjazdy) na estakadę,
 - podjazdy (zjazdy) do wykopu.

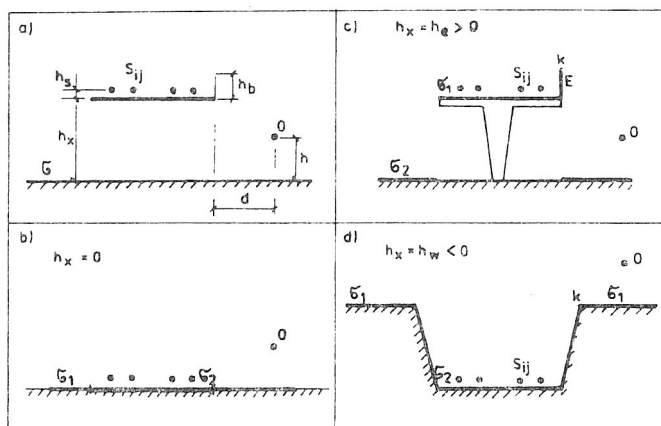
Dany podział na kategorie i typy jest niezależny, gdyż typ SW nie zależy od jego klasy i odwrotnie.

Struktura modelu. Reguła generalna

Na podstawie założenia Z8.6, ekwiwalentny poziom L_{AeqT} hałasu emitowanego z obszaru WWD dany jest wzorem:

$$L_{AeqT} = 10 \lg \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{AeqT}(SW_i)} \quad , \quad (8.1)$$

⁸⁷Przez pojęcie segment widziany bezpośrednio z punktu obserwacji rozumie się taki segment węzła, który nie jest przesłaniany (ekranowany) przez inne segmenty, np. przez nasyp estakady.



Rys. 8.3. Schematy geometryczne segmentów węzła (SW): a) schemat ogólny, b) droga w płaszczyźnie terenu, c) estakada, d) wykop; S - elementarne źródło dźwięku, O - punkt obserwacji, (grubą linią zaznaczono elementy aktywne modelu geometrycznego)

Fig. 8.3. Geometrical diagrams of crossing segments (SW): a) general diagram, b) road in the plane of the terrain, c) elevated road, d) depressed road; S - elementary sound source, O - observation point, (thick line shows active elements of the geometrical model)

gdzie:

$L_{AeqT}(SW_i)$ - ekwiwalentny poziom dźwięku hałasu pochodzącego od i-tego segmentu węzła,

N_s - liczba SW widzianych bezpośrednio z punktu obserwacji.

Po uwzględnieniu def.8.1 oraz założeń Z8.4, Z8.5 i Z8.7, na podstawie wzorów (3.16) i (5.1) otrzymujemy następującą regułę generalną modelu hałasu segmentu węzła SW:

$$L_{AeqT}(SW_i) = 10 \lg \left[\frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^K w_{Ak}(f) \sum_{j=1}^M 10^{0,1 L_{WAeq,j}} \sum_{i=1}^N F_{pk}(S_{ij}, O) \right], \quad (8.2)$$

gdzie:

$L_{AeqT}(SW_i)$ - ekwiwalentny poziom dźwięku segmentu węzła, w dB;

$L_{WAeq,j}$ - ekwiwalentny poziom skorygowanej mocy akustycznej elementarnego źródła dla j-tego pasa ruchu wg (5.7-5.10),

$w_{Ak}(f)$ - znormalizowana charakterystyka widmowa hałasu drogowego, wg wzoru (5.12) i tab. 5.2, $w_{Ak} = 10^{0,1(\Delta L_{Wk} + A_k)}$,

K - liczba pasm częstotliwości,

M - liczba pasów ruchu,

N - liczba źródeł punktowych na m -tym pasie ruchu (rozdz.5.2),
 $F_{pk}(S_{ij}, 0)$ - funkcja propagacji w k -tym pasmie częstotliwości między
 źródłem S_{ij} i punktem obserwacji O , zależna od typu SW.

Założmy, że parametry ruchu na wszystkich pasach jezdni SW są jednakowe. Wtedy $L_{WAeq,j} = L_{WAeq} = \text{const}$ i wyrażenie (8.2) upraszcza się do postaci:

$$L_{AeqT}(SW_i) = \left(L_{WAeq} - 10 \lg(4\pi) \right) + 10 \lg \left(\sum_{k=1}^K w_{Ak}(f) F_{pk}(SW_i) \right), \quad (8.3)$$

gdzie:

$F_{pk}(SW_i)$ - wypadkowa funkcja propagacji dla i -tego SW w k -tym pasmie, wyznaczona jako superpozycja funkcji propagacji $F_{pk}(S_{ij}, 0)$ dla elementarnych źródeł S_{ij} wg zależności:

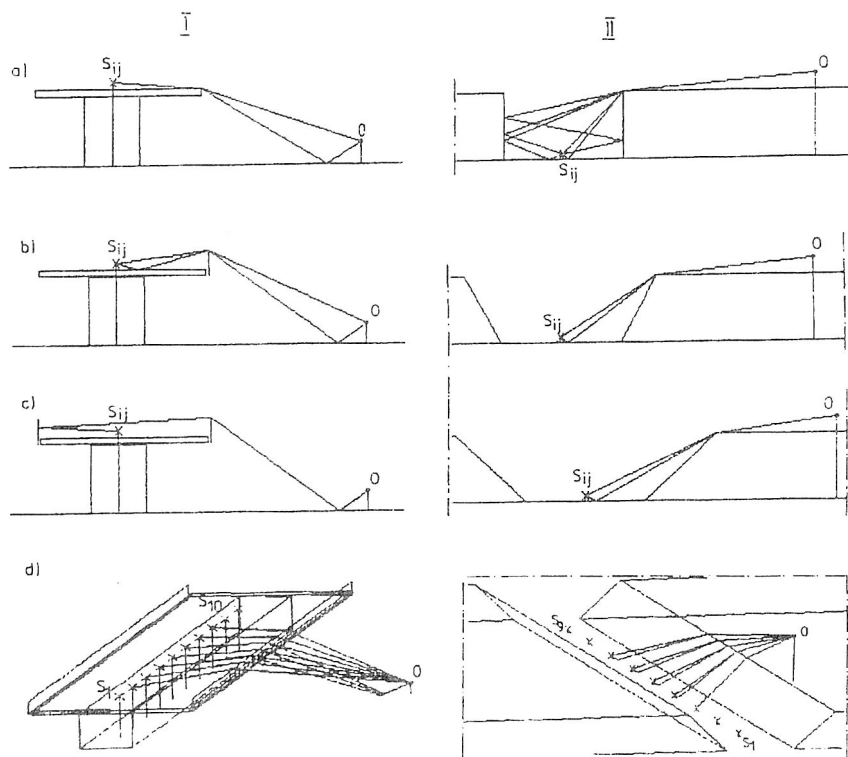
$$F_{pk}(SW_i) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N F_{pk}(S_{ij}, 0), \quad (8.4)$$

w której M i N , jak w (8.2).

Drugi składnik w (8.3) można interpretować jako wypadkowe tłumienie ΔL_A hałasu drogowego emitowanego z obszaru SW. Ponieważ tłumienie to zależy tylko od warunków propagacji dźwięku wynikających z geometrii segmentu, czyli typu SW, składnik ten nazywać będziemy dalej modelem propagacji dźwięku dla segmentu węzła lub w skrócie modelem segmentu węzła.

8.3. Model propagacji dla segmentu węzła

Punktem wyjścia do sformułowania modelu propagacji dźwięku dla wyróżnionych segmentów węzła, podobnie jak dla modelu propagacji dźwięku w przestrzeni zurbanizowanej (rozdz.7), jest ustalenie związków między obiektami rozpatrywanej przestrzeni propagacji dźwięku a zdefiniowanymi (w rozdz.6) obiektami trójwymiarowej przestrzeni ograniczonej. Na rysunku 8.3 pokazano ustalony ogólny schemat zastępczy segmentu węzła oraz przykładowe schematy różnych typów SW, na których grubą kreską zaznaczono elementy geometryczne SW będące aktywnymi obiektami geometrycznej przestrzeni propagacji fali akustycznej (patrz rozdz.6). Dla wszystkich SW przyjmuje się jednakowe założenia dotyczące geometrii jezdni, jak w rozdz.5 (rys.5.1). Zakłada się także możliwość występowania bariery ekranującej o wysokości h_p na krawędzi jezdni.



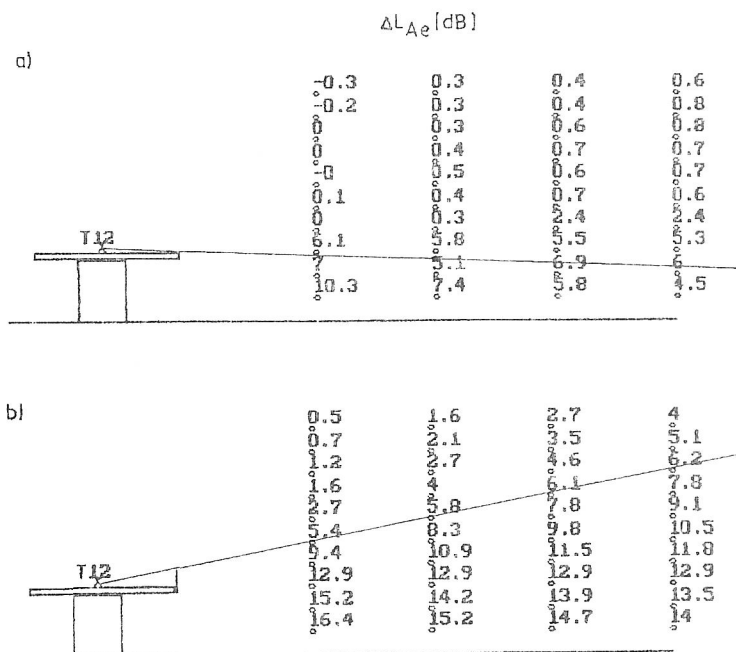
Rys. 8.4. Widok zamodelowanych przykładowo segmentów *estakada* (I) i *wykop* (II) o różnej geometrii wraz z wyznaczonymi trasami promieni dźwiękowych: a, b i c) przekroje poprzeczne segmentów i możliwe trasy promieni dźwiękowych między źródłem S i punktem O, d) widok segmentu i dominujące trasy promieni dźwiękowych między wszystkimi źródłami S i punktem O

Fig. 8.4. View of exemplarily modelled *elevated road* (I) and *depressed road* (II) of different geometry with determined sound ray paths: a, b and c) cross-sections of segments and possible sound ray paths between source S and point O, d) view of segment and dominating sound ray paths between all sources S and point O

Uwzględniając założenia (Z8.3)⁸⁸ i (Z8.4) oraz definicje obiektów aktywnych przestrzeni propagacji dźwięku (rozdz.6), przyjmuje się, że:

- powierzchnia gruntu jest niejednorodną, nieprzezroczystą płaszczyzną odbijającą (rozdz.6.1) o zespolonej impedancji (Z), której

⁸⁸ Konsekwencją tego założenia jest ograniczenie obszaru obserwacji, gdyż stacjonarny model hałasu drogowego obowiązuje dla punktów obserwacji znajdujących się w odległości d większej niż 10 m od krawędzi jezdni (patrz rozdz.5).



Rys. 8.5. Wyniki analizy skuteczności ekranowania ΔL_{Ae} dla segmentu estakada o długości $l_e=120$ m i wysokości $h_e=6$ m: a) bez bariery, b) z barierą o wysokości $h_b=1,5$ m

Fig. 8.5. Results of the analysis of insertion loss ΔL_{Ae} for the elevated road of length $l_e=120$ m and height $h_e=6$ m: a) without a barrier, b) with a barrier of height $h_b=1.5$ m

właściwości akustyczne scharakteryzowane są przez oporność przepływu σ (rozdz.7.2.3),

- obszary powierzchni gruntu różniące się właściwościami pochłaniającymi są wydzielonymi wielobokami płaszczyzny gruntu, którym przypisuje się różne wartości oporności przepływu σ_i ,

- powierzchnia jezdni jest nieprzezroczystą płaszczyzną odbijającą, przy czym rzeczywiste jej wymiary opisane są prostokątem o wymiarach odpowiadających długości l i szerokości w odpowiedniego SW, któremu przypisuje się współczynnik odbicia R_p właściwy dla powierzchni silnie odbijających ($R_p=1$) lub oporność przepływu $\sigma=30000$ [w cgs],

- ściany wykopu są nieprzezroczystymi płaszczyznami odbijającymi, przy czym możliwe położenia punktów odbić ogranicza się do wieloboków opisujących ich rzeczywiste wymiary (patrz rozdz.7.1 - bryły),

- bariery usytuowane na krawędzi drogi są ekranami akustycznymi zdefiniowanymi, jak w rozdz.7.1,

- wszystkie krawędzie wypukłe występujące w przestrzeni geometrycznej są pojedynczymi krawędziami uginającymi (patrz rozdz.6.1).

Dla przyjętych założeń, zgodnie z zasadami modelu geometrycznego (rozdz.6), funkcja propagacji $F_{pk}(S_{ij},0)$ jest superpozycją transmitancji T_{pk} (def.6.1) wszystkich możliwych tras promieni dźwiękowych między źródłem S_{ij} a punktem obserwacji 0. Na podstawie def.(3.7) i (6.3) funkcja $F_{pk}(S_{ij},0)$ jest opisana zależnością (6.29).

Na rysunku 8.4 pokazano przykłady zamodelowanych segmentów węzła SW o różnych geometriach oraz wyznaczone możliwe trasy promieni dźwiękowych, a na rys.8.5 przykładowe wyniki analizy skuteczności ekranowania ΔL_{Ae} dla segmentu estakada bez oraz z barierą akustyczną (w funkcji odległości i wysokości punktu obserwacji 0).

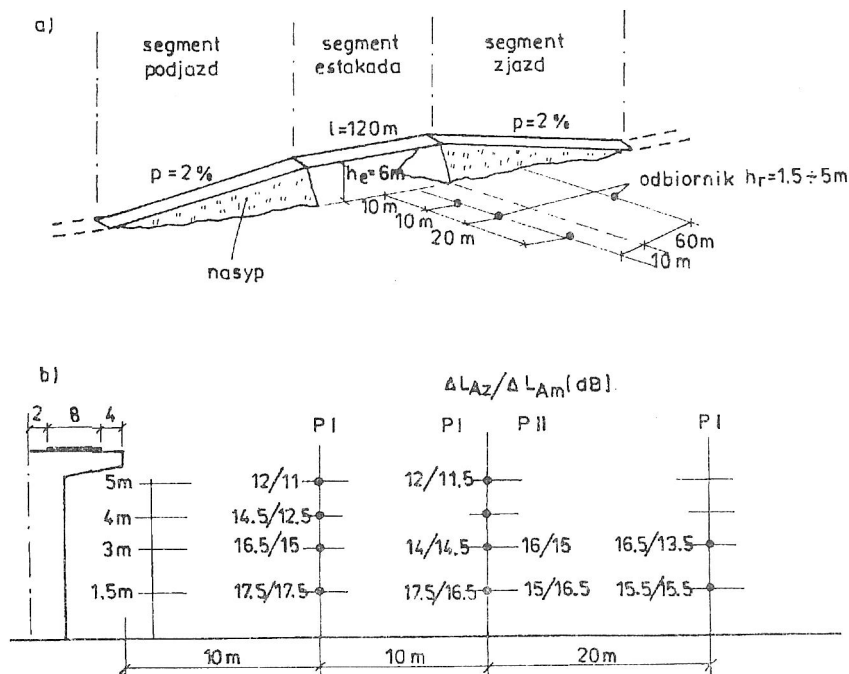
8.4. Weryfikacja eksperymentalna

Podstawowym warunkiem wiarygodności weryfikacji empirycznej modeli jest możliwość kontroli w trakcie trwania eksperymentów czynników wpływających na wypadkowy poziom hałasu w punkcie obserwacji oraz zachowanie przynajmniej 6 dB odstępu od poziomu tła akustycznego. Wykonanie eksperymentów weryfikacyjnych zarówno pełnego modelu WWD, jak i poszczególnych modeli SW w sytuacjach spełniających dane warunki napotyka zasadnicze trudności. W pierwszym przypadku dotyczy to kontroli wszystkich czynników determinujących wypadkowy poziom dźwięku, w przypadku drugim zachowania odpowiedniego odstępu od tła akustycznego⁸⁹.

Z tego względu doświadczalną weryfikację wykonano dla czteropasowej drogi przebiegającej na estakadzie w terenie niezabudowanym. Badano zgodność obliczonych i zmierzonych wartości ekwiwalentnego poziomu dźwięku L_{AeqT} i spadku poziomu dźwięku ΔL_{Aeq} w funkcji odległości d od drogi i wysokości h_r punktu obserwacji. Schemat badanej sytuacji drogowej oraz syntetyczne wyniki pomiarów⁹⁰ i obliczeń pokazano na rys.8.6. W obliczeniach modelowych wypadkowy poziom dźwięku w punkcie obserwacji wyznaczono jako superpozycję dźwięku pochodzącego od odcinka drogi na

⁸⁹ Duże natężenia ruchu (duże poziomy L_{AeqT}) występują w obrębie rozbudowanych układów komunikacyjnych, dla których wydzielenie hałasu poszczególnych segmentów jest niemożliwe. W przypadku prostych układów komunikacyjnych, odpowiadających wyróżnionym typom segmentów WWD, np. droga na estakadzie, natężenia ruchu na nich występujące są na ogół małe ($Q < 1000$ poj/h); ogranicza to obszar wiarygodnych badań do odległości ok. 50 m od jezdni (patrz rozdz.7.5).

⁹⁰ Pomiary wykonano zgodnie z metodyką omówioną w rozdz.4.4.1, 4.5.4 oraz 7.5.2.



Rys. 8.6. a) Schemat sytuacji pomiarowej, b) porównanie zmierzonych (ΔL_{Az}) i obliczonych (ΔL_{Am}) wartości unormowanego ekwiwalentnego poziomu dźwięku L_{AeqT} w funkcji odległości d od drogi i wysokości h_r punktu obserwacji; $\Delta L_A = L_A^r - L_{AeqT}$, gdzie L_A^r - poziom odniesienia w odległości 1 m od krawężnika [147]

Fig. 8.6. a) Measurement site configuration, b) comparison between measured (ΔL_{Az}) and calculated (ΔL_{Am}) values of normalized equivalent sound level L_{AeqT} as a function of distance d from the road and receiver height h_r ; $\Delta L_A = L_A^r - L_{AeqT}$, where L_A^r - reference level at the distance of 1 m from the kerb [147]

estakadzie oraz odcinka drogi na zjeździe. Analiza wyników wskazuje na poprawność modelu propagacji dźwięku (patrz rys.8.6b). Różnice między jednokrotnie zmierzonym ΔL_{Az} i obliczonym ΔL_{Am} spadkiem poziomu hałasu nie przekraczają 3dB a dla większości punktów mieszczą się w granicach 1,5 dB. Uwzględnivszy wartość błędu pomiaru poziomu L_{AeqT} , dla występującego w trakcie pomiaru natężenia ruchu $Q \leq 1000$ poj/h (patrz tab.4.3), uzyskaną zgodność można uznać za zadowalającą. Z porównania zmierzonych i obliczonych bezwzględnych wartości L_{AeqT} wynika, że poziom ten jest szacowany ze stałym nadmiarem ok. 3 dB. Potwierdziły to także wyniki

pomiarów i obliczeń wykonane w odległości $d=10$ m od poziomego odcinka drogi [142/II]. Ponieważ uzyskane wyniki wskazywały na błąd modelu źródła hałasu, reguła (5.8) została skorygowana o 3 dB poprawkę.

2.5. Przykład zastosowania modelu segmentu węzła

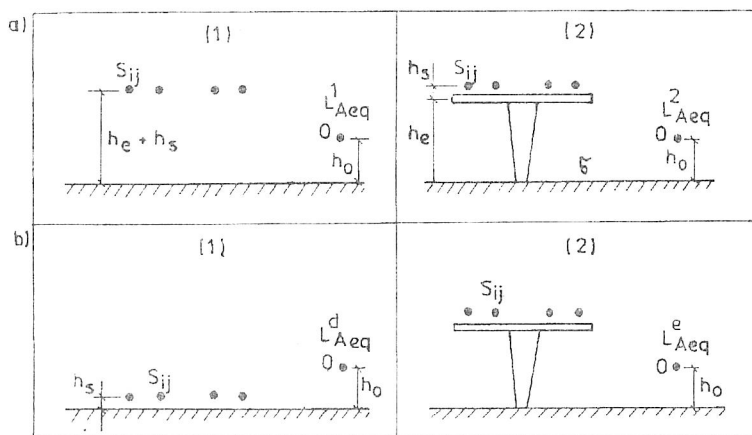
Formułując praktyczną metodę prognozowania hałasu drogowego należy rozważyć dwie wielkości, które charakteryzują właściwości ekranujące estakady: skuteczność ekranowania ΔL_{Ae} oraz dodatkowe tłumienie A_{Ae} .

Skuteczność ekranowania ΔL_{Ae} definiuje się jako różnicę między poziomem L_{AeqT} , który występuje w punkcie obserwacji O dla nieekranowanego (L_{AeqT}^1) oraz ekranowanego (L_{AeqT}^2) zbioru elementarnych źródeł S_{ij} (rys.8.7a):

$$\Delta L_{Ae} = L_{AeqT}^1 - L_{AeqT}^2, \quad (8.5)$$

Dodatkowe tłumienie A_{Ae} definiuje się jako różnicę między poziomem L_{AeqT}^d , który występuje w punkcie obserwacji O dla poziomego odcinka drogi oraz poziomem L_{AeqT}^e dla takiego samego odcinka drogi przebiegającej na estakadzie (rys.8.7b):

$$A_{Ae} = L_{AeqT}^d - L_{AeqT}^e. \quad (8.6)$$



Rys. 8.7. Schematy geometryczne sytuacji przyjętych do analizy: a) skuteczności ekranowania ΔL_e , b) dodatkowego tłumienia A_e , dla segmentu estakada

Fig. 8.7. Geometrical diagrams of situations assumed for analysis: a) shielding efficiency ΔL_e , b) excess attenuation A_e , for elevated road segment

Wielkość pierwsza jest zgodna z definicją skuteczności ekranowania, natomiast druga, w odniesieniu do rozważanej sytuacji, bardziej realistyczna.

Z analizy zależności (8.3) i (8.4) oraz ich geometrycznej interpretacji na podstawie przebiegu tras promieni dźwiękowych (rys.8.4) wynika, że wartości ΔL_{Ae} oraz A_{Ae} zależą od parametrów geometrycznych estakady: wysokości, szerokości i długości, a także właściwości pochłaniających powierzchni gruntu⁹¹. Korzystając z opracowanego modelu segmentu węzła dokonano analizę przebiegu zmian ΔL_{Ae} i A_{Ae} w funkcji parametrów geometrycznych segmentu estakada oraz właściwości pochłaniających powierzchni gruntu. W eksperymentach numerycznych symulowano typowe geometrie segmentu estakada. Przyjmowano [142/II][146][148]:

- wysokość estakady $h_e = 6, 9, 12$ m,
- długość estakady $l_e = 60, 100, 200, 300$ m,
- liczba pasów ruchu $m = 2, 4, 6, 8$ m dla $h_p = 3,5$ m,
- odległość punktów obserwacji $d \in (10-100)$ m,
- wysokość punktów obserwacji $h_r \in (1-9)$ m,
- powierzchnia gruntu: $\sigma = 30\ 000$ i $\sigma = 150$ w cgs.

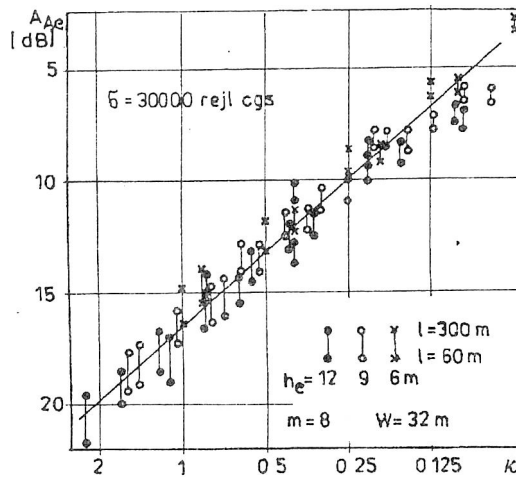
Liczbę oraz rozkład elementarnych źródła hałasu ustalamy na podstawie zasad podanych w rozdz.5.2 dla maksymalnego stopnia dyskretyzacji obszaru jezdni, przyjmując charakterystykę widmową elementarnego źródła S_{ij} , jak w tab.5.2.

Syntetyczne wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rys.8.8 w funkcji parametru⁹² $\kappa = (h_e - h_o)/d$ (oznaczenia jak na rys.8.3), który charakteryzuje położenie punktu obserwacji względem krawędzi estakady. Na rysunku zaznaczono także prostą o współczynnikach wyznaczonych na podstawie analizy regresji wyników badań symulacyjnych, daną wzorem (8.7) [146]

$$A_{Ae} = 10,5 + 10,7 \lg(3,5 \kappa) \quad \text{dla} \quad \kappa \in (2,2-0,06) . \quad (8.7)$$

⁹¹W większości metod prognozowania hałasu drogowego efekty ekranowania i pochłaniania przez powierzchnię gruntu są rozważane niezależnie i następnie dodawane [45/Ch.33][79][175]. Skuteczność ekranowania hałasu drogowego przez ekrany o skończonej długości analizowali m.in. Beracha [7] i Makarewicz [107][113][111], jednak w rozważaniach tych, które odnoszą się do poziomego odcinka drogi, pomija się wpływ właściwości pochłaniających gruntu.

⁹²Dla segmentu węzła - estakada, parametry geometryczne układu: źródło elementarne S - krawędź uginająca, w przekroju prostokątnym do krawędzi są stałe. Założono więc, że w metodzie prognozowania geometrię układu można opisać prostszym parametrem κ , który jest odpowiednikiem stałej Fresnela N.



Rys. 8.8. Dodatkowe tłumienia A_{Ae} obliczone dla segmentu estakada o różnej wysokości h_e i różnej długości l_e w funkcji parametru $\kappa = (h_e - h_r)/d$, dla punktów obserwacji położonych na przeciw segmentu na powierzchni odbijającej ($\sigma = 30000$); $h_e = 6, 9, 12 \text{ m}$, $l_e \in (60-300) \text{ m}$ [146]

Fig. 8.8. Excess attenuation A_{Ae} calculated for elevated roasts segments of different height h_e and different length l_e in the presence of reflected ground surface versus parameter $\kappa = (h_e - h_r)/d$, for receiver position across from the road segment; $h_e = 6, 9, 12 \text{ m}$, $l_e \in (60-300) \text{ m}$ [146]

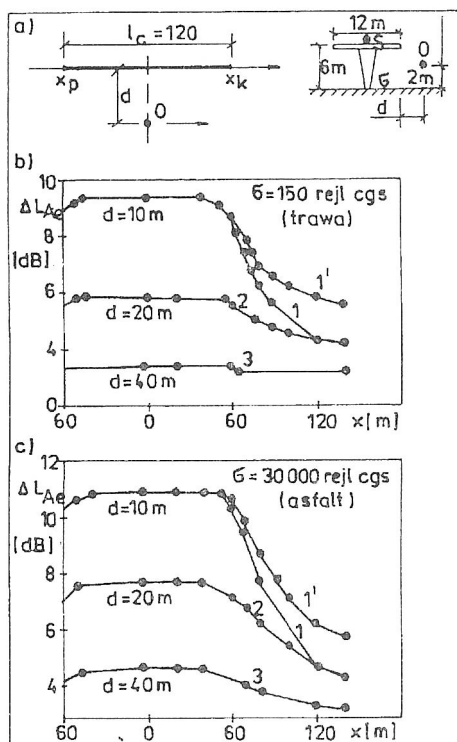
Na rysunku 8.9 przedstawiono obliczone teoretycznie zmiany skuteczności ekranowania ΔL_{Ae} wzdłuż przekrojów przebiegających równoległe do segmentu estakada w odległości d , dla pochłaniającej oraz odbijającej powierzchni gruntu.

Z przeprowadzonej analizy wynikają następujące wnioski istotne w poszukiwaniach praktycznych modeli prognostycznych:

1. Ze względu na zmiany ΔL_{Ae} lub A_{Ae} w otoczeniu segmentu drogi na estakadzie można wydzielić dwa obszary (8.10):

a) obszar I, na przeciw segmentu, w którym skuteczność ekranowania ΔL_{Ae} zależy głównie od położenia punktu obserwacji względem krawędzi estakady, natomiast zmiany ΔL_{Ae} w zależności od położenia punktu obserwacji względem końców segmentu są pomijalnie małe,

b) obszar II, poza segmentem, gdzie skuteczność ΔL_{Ae} zależy od położenia punktu obserwacji względem końców segmentu i maleje wraz ze wzrostem kąta widzenia końca segmentu z punktu obserwacji w wyniku ukośnego padania dominujących promieni dźwiękowych na krawędź estakady.



Rys. 8.9. Wypadkowa skuteczność ekranowania ΔL_{Ae} obliczona dla segmentu estakady w funkcji położenia punktu obserwacji O, przy zmiennych właściwościach pochłaniających powierzchni gruntu: a) schemat sytuacji, b) $\sigma = 150$, c) $\sigma = 30000$ [w cgs]

Fig. 8.9. Resultant shielding efficiency ΔL_{Ae} calculated for the elevated road segment as a function of the observation point position for variable absorption characteristics of the ground surface: a) scheme of situation b) $\sigma = 150$, c) $\sigma = 30000$ [cgs units]

2. W obszarze I dla $\kappa \in (2, 2 + 0,06)$ zmiany dodatkowego tłumienia $A_{Ae'}$, które wynikają ze zmiany szerokości jezdni (liczby pasów ruchu), długości estakady, a także właściwości pochłaniających powierzchni gruntu, nie przekraczają 2 dB. Dodatkowe tłumienie $A_{Ae'}$ dla m-pasowej jezdni na estakadzie, gdzie $m \in (2-8)$, z dokładności do 2 dB można aproksymować zależnością (8.7) [146].

8.6. Uwagi końcowe

W rozdziale wykazano, że metodą kolejnej dyskretyzacji obszaru źródła na jednorodne podobszary możliwe jest zastąpienie ZHŚ o skomplikowanej strukturze wewnętrznej, jakim jest wielopoziomowy węzeł drogowy (WWD), zbiorem stacjonarnych źródeł punktowych o znanej mocy akustycznej. Ponadto możliwe jest wykorzystanie reguł modelu geometrycznego do opisu emisji dźwięku z obszaru ZHŚ oraz wyznaczenie wypadkowego poziomu dźwięku w otoczeniu WWD według zasady superpozycji.

Skonstruowane modele numeryczne dla różnego typu SW umożliwiają badania, których przeprowadzenie w naturalnych warunkach jest niemożliwe. W pracy pokazano przykład zastosowania modelu SW w eksperymentach numerycznych ukierunkowanych na poszukiwanie prostszych modeli, które obowiązują wprawdzie w ograniczonym zakresie sytuacji, lecz są przydatne w praktycznym zastosowaniu do prognozowania.

9. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono syntezę badań autorki nad teoretycznym modelowaniem emisji i propagacji dźwięku do prognozowania klimatu akustycznego. Wprowadzenie w ogólne zagadnienia modelowania emisji i propagacji dźwięku, zawierające przegląd, charakterystyki oraz zakres zastosowania podstawowych metod matematycznego modelowania źródeł dźwięku oraz pól akustycznych przedstawiono w rozdz.2. W układzie pracy uwzględniono podział obszaru badań związanych z prognozowaniem klimatu akustycznego na podstawowe kierunki:

- matematyczne modelowanie złożonych źródeł hałasu (rozdz.3),
- matematyczne modelowanie propagacji dźwięku w złożonych układach przestrzennych (rozdz.6),
- zastosowanie teoretycznych modeli do prognozowania klimatu akustycznego w środowisku zurbanizowanym,
- eksperymentalną weryfikację modeli w oparciu o badania własne oraz innych ośrodków,
- przykłady wykorzystania prezentowanych modeli do rozwiązywania zagadnień o charakterze badawczym oraz praktycznych zgadnień projektowych.

W trakcie formułowania, ewolucji i weryfikacji modeli wykazano, że przyjęte założenia pozwoliły na uzyskanie efektywnych, empirycznie zweryfikowanych modeli prognozujących parametry klimatu akustycznego w złożonych układach przestrzennych.

9.1. Uwagi do modelowania źródeł hałasu środowiskowego

Za podstawę formułowania modeli ZHŚ przyjęto generalne założenie, iż każde ZHŚ można zastąpić zbiorem źródeł elementarnych oraz zasadę superpozycji oddziaływania elementarnych źródeł dźwięku, rozpatrywanych jako niezależne źródła punktowe, scharakteryzowane przez moc akustyczną.

Po zdefiniowaniu, dla potrzeb niniejszej pracy, pojęcia *źródło hałasu środowiskowego* (ZHŚ - def.3.1) oraz sklasyfikowaniu składowych źródeł dźwięku (def.3.2) podano dwa warianty analitycznego sformułowania uogólnionego modelu ZHŚ:

- wariant symulacyjny, w którym elementarne źródła dźwięku reprezentują rzeczywiste, składowe źródła hałasu,
- wariant stacjonarny, w którym elementarne źródła reprezentują emisję dźwięku z wyróżnionych podobszarów ZHŚ.

Dla obu wariantów modelu ZHŚ podano zasady identyfikacji położenia elementarnych źródeł dźwięku, nazwane *modelem struktury ZHŚ* oraz zasady identyfikacji ich mocy akustycznej, nazwane *modelem hałasu źródła*. Dla modelu symulacyjnego rozważono probabilistyczne oraz deterministyczne wersje reguł podanych modeli. Dla stacjonarnego modelu ZHŚ sformułowano ścisłe reguły estymacji ekwiwalentnej mocy akustycznej emitowanej z wyróżnionego podobszaru ZHŚ, na którym występują stacjonarne, lub ruchome źródła składowe, lub/ oraz zdarzenia akustyczne.

Przedstawiony w pracy uogólniony model ZHŚ stanowi całościowe rozwiązanie dla zdefiniowanej klasy powierzchniowych źródeł hałasu środowiskowego (rozdz.2.1). Ze względu na ograniczoną objętość pracy oraz dążność do jej przejrzystości rozważania, dotyczące szczegółowych modeli ZHŚ, ograniczono do modeli hałasu drogowego (rozdz.4, 5 i 8). Uwzględniono tu, że układ komunikacyjny jest charakterystycznym oraz najbardziej uciążliwym źródłem hałasu w środowisku zurbanizowanym. Uogólniony model ZHŚ może być stosowany także do innych obiektów, takich jak np. zajezdnie autobusowe i tramwajowe, parkingi czy kolejowe stacje rozrządowe podano w pracach⁹³ [142][142/II].

Dla rozważanego ZHŚ podano ścisłe sformułowanie symulacyjnego modelu prognozującego zbiór parametrów oceny klimatu akustycznego (rozdz.4). Opierając się na własnych badaniach eksperymentalnych ustalono analityczną postać probabilistycznego wariantu modelu hałasu elementarnego źródła, reprezentującego pojazd samochodowy oraz wyznaczono wartości występujących w nim parametrów dla typowych warunków krajowych. Na podstawie przeprowadzonej procedury weryfikacji eksperymentalnej modelu ZHŚ oraz analizy błędu modelowania wykazano, że model ten spełnia przyjęte w pracy statystyczne kryterium wiarygodności.

Sformułowano także stacjonarny model hałasu ruchu drogowego prognozujący ekwiwalentny poziom hałasu L_{AeqT} (rozdz.5). Deterministyczne reguły oraz parametry modelu hałasu źródła elementarnego ustalono w tym przypadku na podstawie wyników eksperymentów numerycznych z zastosowaniem modelu symulacyjnego. Dokonano przy tym redukcji uwzględnianych w modelu czynników oraz parametrów wejściowych modelu.

Wykazując równoważność symulacyjnego i stacjonarnego modelu hałasu drogowego dla wskaźnika oceny L_{AeqT} i odległości punktów obserwacji $d \geq 10$ m, potwierdzono przyjętą w rozdz.3 tezę, że do prognozowania klima-

⁹³Prace powyższe, realizowane w ramach CPBR 11.4 cel 260, zostały zakończone opracowaniem *Metody prognozowania hałasu emitowanego z obszaru dużych źródeł powierzchniowych* - Instrukcja ITB nr 311, Wydawnictwo ITB, Warszawa 1991.

tu akustycznego każde źródło hałasu środowiskowego z ruchomymi źródłami składowymi można, z założonym błędem, zastąpić zbiorem stacjonarnych źródeł punktowych.

9.2. Uwagi do modelowania propagacji dźwięku

W pracy podano analityczny opis uogólnionego modelu propagacji fali akustycznej w trójwymiarowej przestrzeni ograniczonej, w którym uwzględniono wszystkie podstawowe elementarne zjawiska o charakterze deterministycznym, związane z propagacją fali akustycznej, wpływające na wypadkowe pole akustyczne. Oprócz zjawiska odbicia od powierzchni ograniczających przestrzeń i pochłaniania w ośrodku, uwzględniono także zjawisko wielokrotnej dyfrakcji oraz transmisji przez przegrody o skończonej izolacyjności (rozdz.6). W uogólnionym modelu, którego reguły sformułowano na gruncie geometrycznej teorii propagacji fali, wypadkowe ciśnienie pola akustycznego jest rozważane jako superpozycja ciśnień pochodzących od fal rozchodzących się wzdłuż wszystkich możliwych tras promieni dźwiękowych z uwzględnieniem zjawiska interferencji. Przedstawiony uogólniony model można zatem uznać za kompleksowe ujęcie problemu modelowania pola akustycznego.

Sformułowanie analitycznego opisu uogólnionego modelu propagacji dźwięku wymagało rozwiązania szeregu problemów natury merytorycznej, a także związanych z cyfrową realizacją modeli metodą obrazów pozornych. W tym celu wprowadzono wiele nowatorskich definicji i koncepcji (rozdz.6).

1. Dzięki wprowadzeniu pojęcia *transmitancji* rozwiązano problem spójności analitycznego opisu poszczególnych elementarnych zjawisk akustycznych towarzyszących propagacji dźwięku.

2. Zdefiniowanie *transmitancji obiektowej* (def.6.5) oraz wyprowadzenie opisu analitycznego *transmitancji obiektowej* dla ugięcia (rozdz.6.4) umożliwiło włączenie zjawiska wielokrotnej dyfrakcji do geometrycznego modelu propagacji fali akustycznej, co jest istotnym rozszerzeniem znanych dotychczas modeli.

3. Wprowadzenie do modelu *transmitancji poprawek dyfrakcyjnych* (rozdz.6.4.4) zapewniło ciągłość modelowanego rozkładu pola akustycznego w otoczeniu krawędzi uginającej, a tym samym dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistości.

4. Przyjęcie ciśnieniowej definicji *transmitancji trasy promienia dźwiękowego* (def.6.1) umożliwia uwzględnienie w modelu zjawiska interferencji, pomijanego dotychczas w modelach geometrycznych. Istotną przeszkodą w stosowaniu ciśnieniowego modelu do rozwiązywania praktycznych

zagadnień jest brak charakterystyk fizycznych współczynników odbicia dla typowych powierzchni odbijających⁹⁴.

Pokazano sposób wykorzystania uogólnionego modelu propagacji w metodzie prognozowania hałasu drogowego w obszarze zurbanizowanym (rozdz.7) oraz emisji hałasu z obszaru ZHŚ o złożonej wewnętrznej konfiguracji przestrzennej, na przykładzie wielopoziomowych węzłów drogowych (rozdz.8). W specjalistycznej wersji modelu dla przestrzeni zurbanizowanej uwzględniono charakterystyczne właściwości akustyczne powierzchni gruntu, która jest główną powierzchnią ograniczającą tę przestrzeń.

Na podstawie weryfikacji eksperymentalnej prezentowanych w pracy modeli oraz analizy porównawczej, poprzedzonej każdorazowo szczegółową analizą błędów, stwierdzono, że uzyskane dokładności modelowania są wystarczające z punktu widzenia zastosowania tych modeli do prognozowania klimatu akustycznego, choć uzyskanie poprawnej prognozy wymaga w każdym przypadku uważnego doboru parametrów wejściowych modelu. Wskazano obszary i przyczyny niezgodności modeli obliczeniowych z rzeczywistością.

Przedstawione w pracy modele emisji i propagacji dźwięku ze względu na kompleksowość ujęcia i szeroką weryfikację empiryczną są istotnym wkładem w rozwiązywanie problemu prognozowania hałasu środowiskowego. Rozwiązanie problemu włączenia zjawiska dyfrakcji do geometrycznego modelu propagacji fali akustycznej uważa autorka za swój wkład w rozwój metod geometrycznego modelowania pola akustycznego.

Opracowane specjalistyczne wersje prezentowanych w pracy modeli mogą znaleźć szerokie zastosowanie jako efektywne narzędzia wspomagające projektowanie akustyczne układów i przestrzeni urbanistycznych, a także projektowanie i ocenę skuteczności zabezpieczeń przeciwhałasowych, ocenę jakości akustycznej wewnątrz urbanistycznych itp.

9.3. Uwagi końcowe - kierunki dalszych badań

W świetle przedstawionych rozważań teoretycznych, wyników badań empirycznych, a także wyników prezentowanych w literaturze przedmiotu, można uznać, że problem modelowania emisji hałasu ruchu drogowego został opracowany całościowo. Sformułowano modele analityczne, wyznaczono empiryczne wartości parametrów modeli, oszacowano błąd prognozowania, a analiza porównawcza wykazała równoważność wyników obliczeń uzyskiwanych na podstawie różnych modeli matematycznych.

⁹⁴Wyjątek stanowi tu powierzchnia gruntu (patrz rozdz.7.3).

Uogólniony model emisji ZHS jest dobrą podstawą do formułowania specjalistycznych modeli ZHS, konieczne jest tu jednak ustalenie każdorazowo, na podstawie statystycznie wiarygodnych badań empirycznych, reguł oraz parametrów modeli, a także weryfikacja ostatecznej wersji modelu prognostycznego.

W modelowaniu propagacji dźwięku w przestrzeni zurbanizowanej celowe jest rozważenie następujących zagadnień:

- zastosowanie do opisu właściwości pochłaniających gruntu współczynnika odbicia Q dla fali kulistej, zamiast współczynnik odbicia R_p jak dla fali płaskiej, przyjętego w obecnej wersji modelu, co ogranicza jego zakres zastosowania,

- rozszerzenie modelu przez uwzględnienie zjawisk związanych z warunkami atmosferycznymi, a w szczególności zjawiska refrakcji w wyniku gradientu temperatury oraz prędkości wiatru.

LITERATURA

- [1] Alexandre et al., Road traffic noise, Appl. Science at all Publishers Ltd., London 1975.
- [2] Attenborough K., Hayek S., Lawther J.M., Propagation of sound above porous half-space, JASA 1980, 68(5), 1493-1501.
- [3] Attenborough K., Predicted ground effect for highway noise, JSV 1982, 81(3), 413-424.
- [4] Attenborough K., On the acoustic slow wave in air-filled granular media, JASA 1987, 81(1), 93-102.
- [5] Attenborough K., Review of ground effects on outdoor sound propagation from continuous broadband sources, App.Acoustics 1988 24, 289-319.
- [6] Aylor D., Noise reduction by vegetation and ground, JASA 1972 (51), 197-205.
- [7] Beracha R.J., A simple method for prediction the traffic noise reduction by finite barriers, Acustica 1980, 44(1), 23-26.
- [8] Beracha R.J., About an applications of the Fresnel integrals for calculating the sound reduction by absorbing screens, Acustica 1980, 44.
- [9] Blandamura F., Spagnolo R., A mathematical model for predicting the noise of freely flowing traffic, Acoustica 1974, 30 (4), 236-240.
- [10] Blitz J., Prediction of L_{10} on urban main road., Acoustica 1973, 29, 210-218.
- [11] Blumenfeld D.E., Weiss G.H., Effects of headway distributions on second order properties of traffic noise, JSV 1975, 41 (1), 93-102.
- [12] Bullen R., Fricke F., Sound propagation at street intersection in an urban environment, JSV 1977, 54(1), 123-129.
- [13] Cannelli G.B., Gluck K., Santoboni S., A mathematical model for evaluation and prediction of the mean energy level of traffic noise in Italian towns, Acustica 1983, 53, 32-36.
- [14] Chew C.H., Prediction of traffic noise from expressways - Part I. Buildings flanking one side of expressways, Appl.Acoustics 1989, 29, 203-212.
- [15] Chessel C.J., Propagation of noise along a finite impedance boundary, JASA 1977, 62, 825-834.
- [16] Chien C.F., Soroka W.W., Sound propagation along an impedance plane, JSV 1975, 43(1), 9-20.
- [17] Chien C.F., Soroka W.W., A note on the calculation of sound propagation along an impedance surface, JSV 1980, 69(2), 340-343.

- [18] Chien C.F., Carroll M.M., Sound source above a rough absorbent plane, JASA 1980, 76(3), 827-829.
- [19] Chyla A., Metoda określania zasięgu hałasów lotniczych w zapisie komputerowym, Instrukcja ITB 309, Warszawa 1991.
- [20] Claydon A.D., Culley R.W.D., Marsh P.S., Modelling traffic noise mathematically, Appl. Acoustics 1975 (8), 1-12.
- [21] Cohn L.F., Bowlby W., A theoretically-based method to estimate highway noise levels, with emphasis on parallel barrier insertion loss determination, J.Acoust.Soc.Jpn.(E) 1984 (5)1, 1-10.
- [22] Czarnecki S., Kotarbińska E., Badania własności ekranów przeciwdźwiękowych z uwzględnieniem warunków przestrzennych otoczenia, Archiwum Akustyki, 1976, 11(4), 23-46.
- [23] Davies H.G., Lyon R.M., Noise propagation in cellular urban and industrial space, JASA 1973 (54), 1565-1570.
- [24] De Jong B.A., et al., Propagation of sound over grassland and over an earth, JSV 1983 (86)1, 23-46.
- [25] Delany M.E., et al., The prediction of noise levels L_{10} due to road traffic, JSV 1976, 48(3), 305-325.
- [26] Delany M.E., Bazley E.N., Monopole radiation in the presence of an absorbing plane, JSV 1970, 13, 269.
- [27] Diggory I.S., Oakes B., Computer simulation model for the prediction of traffic noise levels, Appl.Acoustics 1980, 13, 19-31.
- [28] Diggory J.S., et al., Attenuation of vehicle noise over short grass, Appl.Acoustics, 1979, 12(4), 321-327.
- [29] Donato R.J., Propagation of spherical wave near a plane boundary with complex impedance, JASA 1976, 60(1), 34-40.
- [30] Embleton T.F., et al., Outdoor sound propagation over ground of finite impedance, JASA 1976, 59(2), 267-279.
- [31] Embleton T.F., Piercy J.E., Daigle G.A., Effective flow resistivity of ground surfaces determined by acoustical measurements, JASA 1983 74(4), 1239-1244.
- [32] Embleton T.F., Line integral theory of barrier attenuation in the presence of the ground, JASA 1980, 67(1), 42-45.
- [33] Engel Z., i inni, Ekran akustyczne, Wydawnictwo Ministerstwa Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa oraz Instytutu Mechaniki i Wibroakustyki Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 1990.
- [34] Fasold W., Kraak W., Schirmer W., Taschenbuch Akustik, VEB VT Berlin 1984.
- [35] Favre B.M., Noise emission of road vehicles: evaluation of some simple models, JSV 1983, 91(4), 571-582.
- [36] Favre B.M., Gras B.T., Noise emission of road vehicles: reconstitution of the acoustic signature, JSV 1983, 91(4), 571-582.

- [37] Filippi P.J., Habault D., Comments on ground effect analysis surface wave and layer potential representations, JSV 1982, 84(2), 289-295.
- [38] Filippi P.J., Extended sources radiation and Laplace type integral representation: Application to wave propagation above and within layer media, JSV 1983, 91(1), 65-84.
- [39] Fisk D.J., A statistical sampling in community noise measurement, JSV 1973, 30(2), 221-236.
- [40] Franke S.J., Raspet R., Numerical prediction of atmospheric sound pressure levels in shadow zones, JASA 1988, 83(2), 816-820.
- [41] Froseth S.E., Lambert R.F., Elevated measurement of traffic noise above an ideal reverberant city, JSV 1977, 50(3), 353-368.
- [42] Fujiwara K., et al, Attenuation of spherical sound wave diffracted by thick plate, Acoustica 1973 (28), 341-347.
- [43] Fujiwara K., Ando Y., Maekawa Z., Noise control by barriers - Part I. Noise reduction by a thick barrier, Appl. Acoustics 1977 (10) 3.
- [44] Gilbert D., Noise from traffic (interrupted flow). JSV 1977, 51(2), 171-181.
- [45] Gilbert K.E., et al., Calculation of turbulence effects in an upward-refracting atmosphere, JASA 1990, 87(6), 2428-2437.
- [46] Grabek J., Kucharski R., Obliczeniowe metody określania poziomów hałasu zewnętrznego, Wydawnictwo MAGTiOŚ, Warszawa 1977.
- [47] Hallberg B., Larsson C., Israelsson S., Numerical ray tracing in the atmospheric surface layer, JASA 1988, 83(6), 2059-2068.
- [48] Harris C.M., Handbook of Noise Control, McGraw-Hill Book Company, 1979.
- [49] Hayek S.I., Mathematical modelling of absorbent highway noise barriers, Appl. Acoustics 1990, 31, 77-100.
- [50] Hess H.M., Attenborough K., Heap N.W., Ground characterization by short-range propagation measurements, JASA 1990, 87(5), 1975-1986.
- [51] Hoel D.G., Weiss G.H., Properties of noise emitted by vehicular queues, Transp. Res. 1977 (1), 39-44.
- [52] Hothersall D.C., Jones R.K., Computer simulation of road traffic in the region of roundabouts, Proceedings Inter-Noise, Warszawa 1979, (2), 495-498.
- [53] Hutchins D.A., et al, Model studies of acoustic propagation over finite impedance ground, ACUSTICA 1983, 52(3), 169-178.
- [54] Hutchings D.A., et al, Studies of parallel barrier performance by acoustical modelling, JASA 1985 (77) 2, 536-546.
- [55] Isei T., Embleton T.T., Piercy J.E., Noise reduction by barriers on finite impedance ground, JASA 1980, 67(1), 46-57.

- [56] ISO/DP 8297, Acoustics - determination of immision-relevant power levels for multi-source industrial plants - Engeneering method.
- [57] ISO 1996/1-3/, Acoustics - description and measurements of environmental noise.
- [58] Itow T., Diffraction of sound by a wall and wall shape obstacle, Proceedings of Noise Control, Warszawa 1976.
- [59] Ivey E.S., Russell G.A., Acoustical scale model study of attenuation of sound by wide barriers, JASA 1977, 62(3), 601-606.
- [60] Jacobs L.J.M., et al, A computer model to predict traffic noise in urban situations under free flow and traffic light conditions, JSV 1980, 72(4), 523-537.
- [61] Janecek P., A rectangular plane sound source, Appl. Acoustics 1989, 27, 263-274.
- [62] Jaroach A., Jurkiewicz J., Rudno-Rudzińska B., Numerical model of sound field of a screened noise source in industrial space. Proceedings INTER NOISE 88, Avignon-France 1988.
- [63] Jaroach A., Rabiega M., Rudno-Rudzińska B., Numerical predictive model of noise due to open air plant with moving sources. Proceedings 8th Symposium FASE 89, Zaragoza-Spain 1989, (A.1.8), 35-38.
- [64] Jaroach A., Rabiega M., Rudno-Rudzińska B., Theoretical prediction of train noise nearby railway shunting-yard., Proceedings 6th Hungarian Seminar and Exhibition on Noise Control, Pecs, Hungary 1989,
- [65] Jaroach A., Rabiega M., Rudno-Rudzińska B., Metoda prognozowania hałasu emitowanego z obszaru dużych źródeł powierzchniowych, Instrukcja ITB nr 311, Warszawa 1991.
- [66] Jarzęcki J., Makarewicz R., Propagacja hałasów generowanych przez pojedyncze ruchome źródło w terenie otwartym, Archiwum Akustyki 1982 17(2), 141-151.
- [67] Jarzęcki J., Metoda określania poziomu równoważnego L_{AeqT} hałasu drogowego, Materiały XXXVIII OSA, Poznań 1991, 113-116,
- [68] Johnson D.R., Saunders E.G., The evaluation of noise from freely flowing road traffic. JSV 1968, 7(2), 287-309.
- [69] Jonasson H.G., A theory of traffic noise propagation with application to L_{eq} , JASA 1977, 61(6), 1403-1417.
- [70] Jonasson H.G., Sound reduction by barriers on the ground, JSV 1972, 22(1), 113-126.
- [71] Jones H.W., et al., An experimental and theoretical study of the modelling of road raffic noise and its transmission in the urban environment, Appl. Acoustics 1980, 13(4), 251-266.
- [72] Jurkiewicz J., Rudno-Rudzińska B., Opracowanie symulacyjnej metody prognozowania hałasów komunikacyjnych w zadanym otoczeniu, Raporty Politechniki Wr. Nr I28/S-040/84.

- [73] Jurkiewicz J., Rudno-Rudzińska B., Model propagacji fali akustycznej w przestrzeni trójwymiarowej z uwzględnieniem dyfrakcji. Proceedings NOISE CONTROL 85, Kraków 1985.
- [74] Jurkiewicz J., Rudno-Rudzińska B., Opracowanie i weryfikacja modelu propagacji fali akustycznej w przestrzeni trójwymiarowej z uwzględnieniem odbić i ugięć, Raporty PWR. Nr I28/S-024/85, Wrocław 1985.
- [75] Kawai T., Fujimoto K., Itow T., Noise propagation around a thin half-plane, *Acustica* 1977, (38), 313-323.
- [76] Kawai Y., Terai T., The application of integral equation methods to the calculation of sound attenuation by barriers, *App. Acoustics* 1990, 31, 101-117.
- [77] Keller J.B., Geometrical theory of diffraction, *Journal of The Optical Society Of America* 1962, 52 (2), 116-130.
- [78] Kerber G., Badania modelowe parametrów akustycznych układów urbanistycznych, Prace KA UAM w ramach programu rządowego PR-5, ITB Warszawa 1980,
- [79] Kucharski R. i inni, Obliczeniowe metody oceny klimatu akustycznego w środowisku, Wydawnictwa IOŚ, Warszawa 1988.
- [80] Kułowski A., Modyfikacja promieniowej metody modelowania pola akustycznego w pomieszczeniach, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 464, Elektronika nr LXXIV, Gdańsk 1991.
- [81] Kurze U.J., Anderson G.S., Sound attenuation by barriers, *Appl. Acoustics* 1971, 4, 35-53.
- [82] Kurze U.J., Statistic of road traffic noise, *JSV* 1971, 18(2), 171-195,
- [83] Kurze U.J., Noise from complex road traffic, *JSV* 1971, 19(2), 167-177,
- [84] Kurze U.J., Scattering of sound in industrial spaces, *JSV* 1985, 98(3), 349-364.
- [85] Kurze U.J., Noise reduction by barriers, *JASA* 1974, 55 (3), 504-517,
- [86] Kuttruff H., A mathematical model for noise propagation between buildings, *JSV* 1982, 85(1), 115-128.
- [87] Larsson C., Hallberg B., Israelsson S., A method to estimate meteorological effects on sound propagation near the ground, *Appl. Acoustics* 1988, 25, 17-31.
- [88] Larsson C., Israelsson S., Effects of meteorological conditions and source height on sound propagation near the ground, *Appl. Acoustics* 1991, 33, 109-121.

- [89] Larsson C., Measurements of meteorological effects on sound propagation near the ground, *Procc. Inter Noise 90*, Gothenburg Sweden 1990, 331-334.
- [90] Lee S.W., et al, Impedance formulation of the fast field program for acoustic wave propagation in the atmosphere, *JASA* 1986, 79(3), 628-634.
- [91] Leschnik W., Zur Schallausbreitung in bebauten und bepflanzten Gebieten. *Acustica* 1980 (44), 14-22.
- [92] Leschnik W., Sound propagation in urban and forest area. *Acustica* 1980, 69, 1716-1723.
- [93] Lewis P.T., The noise generated by single vehicles in freely flowing traffic, *JSV* 1973, 30(2), 191-206.
- [94] Lewis P.T., The noise generated by single vehicles in freely flowing traffic - some further comments, *JSV* 1977, 55(3), 472-473.
- [95] Lewis P.T., James A., Noise levels in the vicinity of traffic roundabouts, *JSV* 1980, 72(1), 51-69.
- [96] Liu Xiaotu, Analysis of the acoustical environment of urban dwellings, *Appl. Acoustics* 1990 (29), 273-287.
- [97] Lyon R.H., Role of multiple reflection and reverberation in urban noise propagation, *JASA* 1974, 55(3), 493-503.
- [98] Maekawa Z., Noise reduction by distance from sources of various shapes, *Appl. Acoustics* 1970, 3, 225-238.
- [99] Maekawa Z., Environmental sound propagation, *Proceedings of ICA*, London 1974
- [100] Maekawa Z., Noise shielding on highway, *Proceedings of Noise Control*, Warszawa 1976, 55-64.
- [101] Maekawa Z., Simple estimation methods for noise reduction by various shaped barriers, *Proceedings of Noise Control 85*, Kraków 1985, 579-581.
- [102] Makarewicz R., Metoda wyznaczania poziomu równoważnego L_{eq} , *Archiwum Akustyki* 1977, 12(2), 101-112.
- [103] Makarewicz R., Kerber G., Metoda przewidywania wartości poziomu ekwiwalentnego w strukturze urbanistycznej, *Archiwum Akustyki* 1978, 13(4), 261-278.
- [104] Makarewicz R., Intensity of sound field generated by moving source in the semi-space with a stratified medium, *Acustica* 1980, 45(2), 115-121.
- [105] Makarewicz R., Theoretical foundations of urban noise control. *JASA* 1983, 74(2), 543-558.
- [106] Makarewicz R., *Podstawy teoretyczne akustyki urbanistycznej*, Warszawa, PWN 1984.

- [107] Makarewicz R., Jarzęcki J., Barrier attenuation of traffic noise, *Appl.Acoustics* 1991 32, 3-11.
- [108] Makarewicz R., Traffic noise in built-up area, *Appl.Acoustics* 1991, 34, 37-50.
- [109] Makarewicz R., Shielding of noise in built-up area, *JSV* 1991, 148(3), 409-422.
- [110] Makarewicz R., Krasnowska I., Traffic noise in an urban area in terms of A-weighted sound exposure level, *Appl.Acoustics* 1991, 37, 65-74.
- [111] Makarewicz R., Zunifikowane metody pomiarowe i obliczeniowe własności akustycznych elementów urbanistycznych, Instrukcja ITB nr 315, Warszawa 1991.
- [112] Makarewicz R., Influence of Doppler and convection effects on noise propagation, *JSV* 1992, 155(2), 353-364.
- [113] Makarewicz R., Barrier attenuation in terms of A-weighted sound exposure level, *JASA* 1992, 91(3), 1500-1503.
- [114] Malecki I., Teoria fal i układów akustycznych, Warszawa, PWN 1964.
- [115] Marsh K.J., Determination of sound power levels for industrial purposes, *Appl.Acoustics* 1981, 14, 113-127.
- [116] Marsh K.J., The Concave model for calculating the propagation of noise from open-air industrial plants, *Appl. Acoustics* 1982, 15, 411-425.
- [117] Mohsen E.A., Oldham D.J., Traffic noise reduction due to the screening effect of balconies on a building facade, *Appl.Acoustics* 1977 (10), 243-257.
- [118] Nelson P.M., Classifying road vehicles for the predicting of traffic noise, 9-th International Congress on Acoustics, Madrid 1977 (1-E), 166-170.
- [119] Nelson P.M., Transportation noise reference book, Butterworth & Co, 1987.
- [120] Nils L., Wapenaar C.P.A., The influence of wind and temperature gradients on sound propagation, calculated with the two-way wave equation, *JASA* 1990, 87(5), 1987-1997.
- [121] Ohta M., et al., A statistical theory for road traffic noise based on the composition of component response waves and its experimental confirmation, *JSV* 1977, 52(4), 587-601.
- [122] Pierce A.D., Diffraction of sound around corners and over wide barriers, *JASA* 1974, 55(5), 941-955.
- [123] Pierce A.D., Hadden W.J., Plane diffraction by wedge with finite impedance, *JASA* 1978, 63(1), 17-27.
- [124] Piercy J.E., Embleton T.F., Review of noise propagation in the atmosphere, *JASA* 1977, 61(6), 1403-1418.

- [125] Rabiega M., Rudno-Rudzińska B., The assessment of noise level emitted by multi-source plant. Proceedings NOISE CONTROL 88, Cracow-Poland 1988.
- [126] Rajpert T., Hałas lotniczy i sposoby jego zwalczania, Warszawa, WKiŁ, 1980.
- [127] Rathe E.J., Note on two common problems of sound propagation, JSV 1969, 10(3) 472-479.
- [128] Rathe E.J., Sound reduction by barriers, JSV 1969, 10(3).
- [129] Rathe E.J., et al., Survey of the exterior noise of some passenger cars, JSV 1973, 29(4), 483-493.
- [130] Rathe E.J., Railway noise propagation, JSV 1977, 51(3), 371-388.
- [131] Rubinowicz W., Teoria dyfrakcji Kirchhoffa i jego interpretacja na podstawie poglądów Younga, Ossolineum 1972.
- [132] Rudder F.F., Line source and site characterizations for defining the sound transmission loss of building facades, JSV 1983, 91(3), 403-424.
- [133] Rudno-Rudzińska B., i inni, Badania dokładności pomiaru parametrów rozkładu hałasu komunikacyjnego metodą próbkowania. Materiały XXIII Otwartego Seminarium z Akustyki, Wisła 1976.
- [134] Rudno-Rudzińska B., i inni, Matematyczny model hałasu ruchu drogowego. Materiały XXIV Otwartego Seminarium z Akustyki, 1977.
- [135] Rudno-Rudzińska B., Zalewski J., Prediction of community noise using the digital simulation method, Proceedings FASE 78, Warszawa 1978, (III-31) 147-150.
- [136] Rudno-Rudzińska B., i inni, Hałas pojedynczego pojazdu poruszającego się w strumieniu ruchu. Materiały XXVII Otwartego Seminarium z Akustyki, Warszawa-Puławy 1980 (2), 4-115.
- [137] Rudno-Rudzińska B., Model symulacyjny do estymacji poziomu hałasu pojazdów poruszających się w swobodnym strumieniu ruchu. Raporty PWr. Nr I28/PRE-034/81.
- [138] Rudno-Rudzińska B., Opracowanie symulacyjnej metody prognozowania hałasów komunikacyjnych w zadanym otoczeniu, Raporty PWr. Nr I28/S-044/83.
- [139] Rudno-Rudzińska B., Rozkład składowych fali akustycznej wokół krawędzi uginającej, Prace XXXIII OSA, Rzeszów 1986, 63-66.
- [140] Rudno-Rudzińska B., Skuteczność bariery akustycznej o skończonej długości umieszczonej na powierzchni gruntu, Pr. Nauk. PWr. 1987, Nr 58 (Konferencje 19).
- [141] Rudno-Rudzińska B., Geometryczny model propagacji fali akustycznej w przestrzeni ograniczonej z uwzględnieniem zjawiska ugięcia i odbicia (XXXIV OSA), Pr. Nauk. PWr. 1987, Nr 58 (Konferencje 19).

- [142] Rudno-Rudzińska B., i inni, Metoda prognozowania hałasu emitowanego z obszaru dużych źródeł powierzchniowych, Raporty PWr. Nr: I28/SPR-040/87, I28/SPR-066/88.
- [143] Rudno-Rudzińska B., i inni, Metoda prognozowania hałasu emitowanego z obszaru wielopoziomowych węzłów drogowych i parkingów, Raporty PWr. Nr I28/SPR-039/87.
- [144] Rudno-Rudzińska B., Prediction of L_{eq} noise level emitted by multi-level crossings, Proceedings NOISE CONTROL 88, Cracow-Poland 1988, 471-474.
- [145] Rudno-Rudzińska B., Prognozowanie hałasu w środowisku zurbanizowanym, Materiały XXXV OSA, Białowieża 1988 (1), 52-65.
- [146] Rudno-Rudzińska B., Modelling traffic noise from multi-level crossing, Proceedings 8th Symposium FASE 89, Zaragoza - Spain 1989, (A.1.3), 15-18.
- [147] Rudno-Rudzińska B., Prediction of L_{eq} distribution in the vicinity of elevated road, Proceedings 6th Hungarian Seminar and Exhibition on Noise Control, Pecs-Hungary 1989, 462-465.
- [148] Rudno-Rudzińska B., Stacjonarny równoważny model hałasu ruchu drogowego, Materiały XXXVIII Otwartego Seminarium z Akustyki, Poznań, 1991.
- [149] Rudno-Rudzińska B., Metoda prognozowania hałasu wielopoziomowych węzłów drogowych, Materiały XXXVIII Otwartego Seminarium z Akustyki, Poznań, 1991.
- [150] Sabatier J.M., et al., The interaction of airborne sound with the porous ground: The theoretical formulation, JASA 1986 79(5), 1345-1352.
- [151] Sadowski J., Postęp badań w zakresie akustyki urbanistycznej na przykładzie m.st. Warszawy, Archiwum Akustyki 1,5/1970, 21-52.
- [152] Sadowski J., Akustyka w urbanistyce, architekturze i budownictwie, Warszawa, Arkady, 1971.
- [153] Sadowski J., Traffic noise in Poland in the time being and in the future, Proc. 7th Int. Cong. on Acoustics, Budapest, 1973.
- [154] Sadowski J., Acoustical problem dealing with highway designing, Proc. 8th Int. Cong. on Acoustics, London, 1974.
- [155] Sadowski J., Habitations system and measuring systems for noise maps developed according to the aspects of silence protection in towns, Akusztikai Tanulmányok, IV. AICB 9 Budapest 1977, 236-259.
- [156] Sadowski J., Polish method of preparation of noise maps, Proc. 9th 571Int. Cong. on Acoustics, Madrid 1977, A28.
- [157] Sadowski J., Akustyka architektoniczna, Warszawa, PWN, 1976,
- [158] Sadowski J., Podstawy stosowania naturalnych i sztucznych przegród urbanistycznych do ochrony budynków mieszkalnych przed hałasem

- komunikacyjnym i przemysłowym, cz.I-IV (Temat naukowo-badawczy Na-58/ PR-5), ITB Warszawa 1980.
- [159] Sadowski J., Kształtowanie klimatu akustycznego w budynkach za pomocą rozwiązań urbanistycznych, Wyd. ITB - Monografie, Warszawa 1982.
 - [160] Sadowski J., Wytyczne projektowania akustycznego w urbanistyce (Temat badawczy PR-5), ITB Warszawa 1980 (maszynopis nr arch. 80/1,2)
 - [161] Sadowski J., Podstawy akustyki urbanistycznej, Arkady, Warszawa, 1982.
 - [162] Sadowski J. i inni, Metody sporządzania kompleksowych planów akustycznych miast i obszarów - Instrukcja ITB 310, Warszawa 1991,
 - [163] Safeer H.B., et al., Errors due to sampling in community noise level distribution, JSV 1972, 24(3), 365-376.
 - [164] Safeer H.B., Community noise level - a statistical phenomenon, JSV 1973, 26(4), 483-502.
 - [165] Scholes W.E., Sargent J.W., Designing against noise from road traffic, Appl. Acoustics 1971,4, 203-234.
 - [166] Shaw E.A.G., Olson N.T., Theory of steady state urban noise for an ideal homogeneous city, JASA 1972, (51), 1781-1793.
 - [167] Shuoxian Wu, An approximately extended traffic noise prediction formula based on an exponentially distributed vehicles model, Appl.Acoustics 1989,26, 25-31.
 - [168] Stawicka-Wałkowska M., Investigations on traffic noise annoyance on the territories adjacent to express routes, Proc. 76 Noise-Control, Warsaw 1976.
 - [169] Stawicka-Wałkowska M., Badania uciążliwości hałasu Trasy Łazienkowskiej oraz opracowanie wytycznych zabezpieczeń akustycznych, cz. I,II,III, (Temat badawczy FA-34/77) ITB Warszawa 1977.
 - [170] Stawicka-Wałkowska M., Efektywność zabezpieczeń akustycznych zaprojektowanych dla Trasy "Ł" na podstawie badań modelowych ITB-CSTB, Prace ITB, 1980, 1/2, 85-92.
 - [171] Stawicka-Wałkowska M., Kształtowanie miniwnętrz urbanistycznych z punktu widzenia zabezpieczenia przed hałasem zewnętrznym, Praca naukowo-badawcza NA-68, ITB, Warszawa 1982 [maszynopis].
 - [172] Stawicka-Wałkowska M., Analiza właściwości akustycznych miniwnętrz osiedlowych w aspekcie tendencji rozwojowych w urbanistyce, Materiały Konferencji Noise Control, Kraków 1982.
 - [173] Stawicka-Wałkowska M., Wpływ kształtu miniwnętrz urbanistycznych na ich klimat akustyczny, Prace ITB, Warszawa 1982, 4, 53-63.

- [174] Stawicka-Wałkowska M., Kierzkowski M., Wytyczne ustalania przeciwhałasowych stref ochronnych wokół zakładów przemysłowych, Wydawnictwo ITB: Instrukcja 250/1983; Instrukcja 280/1987 (wyd.2 znówel.).
- [175] Stawicka-Wałkowska M., Czynniki akustyki w projektowaniu urbanistycznym, Wydawnictwa ITB (Seria: Rozprawy), Warszawa 1988.
- [176] Straszewicz W., Analiza geometryczna własności pola akustycznego w obszarach ograniczonych. Rozprawa habilitacyjna Polit. Warszawskiej, 1972.
- [177] Takagi K., et al., Investigation on road traffic noise based on an exponentially distributed vehicles model - single line flow of vehicles with the same acoustic power, JSV 1974, 36(3), 417-431.
- [178] Takagi K., Some remarks on practical methods for calculating acoustical diffraction, Appl. Acoustics 1990, 31, 119-132.
- [179] Thomasson S.I., Sound propagation above a layer with a large refraction index, JASA 1977, 61(3), 659-674.
- [180] Varol Y.L., et al., Applying simulation to highway intersection design, Simulation 1977, 28(4), 97-105.
- [181] VDI 2714. Schallausbreitung im Freien, 9-Aktualisierung, Mai 1986.
- [182] Walerian E., Janczur R., Teoria dyfrakcji stosowana do opisu skuteczności ekranów akustycznych, Prace IPPT PAN, 1985.
- [183] Walerian E., Half-plane edge and rigid angle wedge as elements causing diffraction in urban area, Archives of Acoustics, 1988 (13), 1-2, 157-189.
- [184] Wenzel A.R., Propagation of waves along an impedance boundary, JASA 1974 (55), 956-963.
- [185] Wiener F.M., Sound propagation in urban areas, JASA 1965, 37, 38-747.
- [186] Yamaguchi S., Kato Y., A prediction method of non-stationary road traffic noise based on fluctuation patterns of an average number of flowing vehicles, Appl. Acoustics 1989, 27, 103-118.
- [187] Yamamoto K., Yamashita M., Propagation of road traffic noise over ground, J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 1987, 8(1), 17-19.
- [188] Yamashita M., Yamamoto K., Scale model experiments for prediction of road traffic noise and the design of noise control facilities, Appl. Acoustics 1990, 31, 185-196.
- [189] Yeow K.W., A stochastic model of the noise field emitted from traffic in steady flow, JSV 1974, 32(2), 227-239.
- [190] Yeow K.W., Decay of sound levels with distance from a steady source observed in a built-up area, JSV 1977, 52(1), 151-154.

- [191] Yeow K.W., et al., Method of prediction L_{eq} created by urban traffic, JSV 1977, 55(1), 103-109.
- [192] Yeow K.W., Popplewell N., Mackay J.F., Shielding of noise from statistically stationary traffic flows by simple obstacles, JSV 1978, 57(2), 203-224.
- [193] Yuzawa M., Sone T., Sound attenuation by multiple barriers, Appl. Acoustics 1979, 12(6), 447-458.
- [194] Yuzawa M., et al., Noise reduction by various shape of barrier, Appl. Acoustics 1981, 14(10), 65-73.
- [195] Zuchowicz-Wodnikowska I., Metoda określania uciążliwości zasięgu hałasów przemysłowych wraz z programem komputerowym, Instrukcja ITB nr 308, ITB Warszawa 1991.
- [196] Żyszkowski Z., Podstawy elektroakustyki, Warszawa, WNT, 1965.

Praca wpłynęła do Redakcji 15.06.1993 r.

Po poprawieniu 11.11.1993 r.

MODELLING SOUND EMISSION AND PROPAGATION

for prediction of the acoustic climate in urban environment

This work deals with the problems of accoustical climate prediction. The basic methods of modelling the emission and propagation of environmental noise, are discussed here. The general mathematical model of sound emission for the defined class of the plane environmental noise sources consisting of stationary and moving sources, have been presented. The results have been obtained under the assumptions that each complex environmental noise source may be considered as a set of the point sources of sound power which corresponds to the immission relevant sound power level.

With regards to traffic noise two models of noise source have been developed. The first one is a simulation model of freely flowing traffic noise in which a traffic stream is approximated by a sequence of moving nondirectional, uncorrelated point sources radiating the acoustic energy in a hemisphere. Each vehicle is considered as a point source of acoustic power dependent on its type and velocity. The traffic parameters such as: the type of vehicle, its velocity and acoustic power as well as the space between successive vehicles, are assumed to be random variables. This model allows one to predict the set of acoustic climate parameters $\{L_{A01}, L_{A10}, L_{A50}, L_{A90}, L_{A99}, L_{AeqT}\}$.

The second one is a simplified, stationary model for prediction only of an equivalent continuous A-weighted sound pressure level L_{AeqT} . In this model the road section is considered as a plane source of uniformly distributed sound power. It was assumed that the road section can be represented by a set of equivalent, stationary point sources of acoustic power dependent on traffic conditions while the number of sources and their distribution depend on the length of a road and number of traffic lanes.

The empirical parameters of both models were defined taking into account the results of the author's research. The model error and error of noise parameters prediction, were estimated.

An analytical description of a general model of acoustic wave propagation in bounded space has been developed. In the model, which is based on the geometrical acoustics, the phenomena such as: geometrical spreading, atmospheric absorption, multiple reflection and diffraction of sound wave, were incorporated.

In calculation the concept of point to point acoustic transfer function, defined as the ratio of acoustic pressure at the end and the beginning of each analyzed sound ray path, has been applied. The total transfer function of bounded space is derived as the superposition of transfer functions of all the determined sound paths between sound source and the observer. The averaging in frequency band, as well as the interference phenomena, were incorporated into calculation of the root-mean-square value of total transfer function.

In the developed model, the diffracted wave is assumed to be both in the shadowed and illuminated regions. To compute the complex diffraction coefficient the Pierce' solution, which is based on Keller' geometrical theory of diffraction, was adopted. For sound ray passing near the edge but out of a shadow zone, the diffraction corrections are introduced to take account of the influence of edge scattering. Insertion of the diffraction phenomena in the geometrical model of acoustic field within the bounded space, improves the contemporary models based on the mirror images method.

The application of geometrical model for predicting sound propagation in a built-up area as well as traffic noise emission from multi-level crossings, has been shown.

In the developed method of calculating a sound field in urban area, the contribution from every source along all possible sound paths is computed considering the multiple sound reflection and diffraction due to individual buildings. For the calculation of the ground effect the well known description of the field of monopole above finite impedance surface characterized by acoustic flow resistivity, has been used.

From stationary traffic noise model and geometrical model of sound propagation, the complete model that enables one to calculate traffic noise level distribution in built-up area, has been constructed. The validity of the computer-aided predictive model was examined. The comparison of measured and calculated parameters of traffic noise for typical urban situations, has been presented.

The examples of application of the developed model for solving the problems connected with practical problems of acoustical design, are demonstrated too. The analysis of edge scattering effect and wave interference influence on the distribution of traffic noise within an urban interior of different shape, was made. On the basis of experimental verification and the comparative analysis (preceded by the error analysis), it has been proved that the obtained accuracy of modelling is sufficient.

The result of this work is an empirically verified comprehensive method of traffic noise prediction, which can be widely used as an effective tool supporting acoustical design of urban systems as well as the design of noise protection, assessment of acoustic quality of urban interiors, etc. Some further fields of study have been pointed out in the summary.

Verified by Marzena Luczkiewicz

SPIS RZECZY

1. WSTĘP	6
1.1. Zarys historyczny i stan badań	7
1.2. Cel pracy	11
1.3. Układ pracy.....	13
2. METODY MODELOWANIA W AKUSTYCE URBANISTYCZNEJ	15
2.1. Wprowadzenie	15
2.2. Metody modelowania źródeł hałasu środowiskowego	16
2.3. Metody modelowania pola akustycznego w układach przestrzen- nych	19
2.4. Modele pola akustycznego w przestrzeni zurbanizowanej	21
2.5. Problemy empirycznej weryfikacji modeli emisji i propagacji hałasu	24
3. MODELOWANIE ŹRÓDEŁ HAŁASU ŚRODOWISKOWEGO	27
3.1. Wprowadzenie. Określenia	27
3.2. Model źródła hałasu środowiskowego	29
3.3. Analityczne sformułowanie modelu	31
3.4. Modele symulacyjne	35
3.5. Modele zastępcze	37
3.6. Wnioski końcowe	50
4. MODEL SYMULACYJNY HAŁASU ARTERII KOMUNIKACYJNEJ	51
4.1. Wprowadzenie	51
4.2. Założenia modelu. Reguła generalna	53
4.3. Model symulacyjny struktury ZHŚ	56
4.4. Model hałasu źródła elementarnego	59
4.5. Eksperymentalna weryfikacja modelu	67
4.6. Uwagi końcowe.....	72
5. MODEL ZASTĘPCZY HAŁASU ARTERII KOMUNIKACYJNEJ	73
5.1. Wprowadzenie	73
5.2. Założenia	73
5.3. Model struktury źródła	75
5.4. Model hałasu źródła elementarnego	76
5.5. Weryfikacja modelu hałasu źródła elementarnego	83
5.6. Modele zastępcze hałasu odcinka drogi	84
5.7. Uwagi końcowe	88
6. GEOMETRYCZNY MODEL PROPAGACJI FALI AKUSTYCZNEJ W OGRANICZONEJ PRZESTRZENI TRÓJWYMIAROWEJ	89
6.1. Wprowadzenie	89
6.2. Sformułowanie analityczne geometrycznego modelu propagacji	91

6.3. Model odbicia i przenikania przez płaszczyznę	97
6.4. Model ugięcia promienia dźwiękowego	98
6.5. Transmittancja wypadkowa	111
6.6. Uwagi końcowe	113
7. ZASTOSOWANIE GEOMETRYCZNEGO MODELU PROPAGACJI FAL AKUSTYCZNYCH DO PROGNOZOWANIA KLIMATU AKUSTYCZNEGO ŚRODOWISKA ZURBANIZOWANEGO	114
7.1. Wstęp	114
7.2. Model propagacji hałasu w przestrzeni zurbanizowanej	114
7.3. Zastosowanie modeli emisji i propagacji do prognozowania hałasu drogowego w przestrzeni zurbanizowanej	128
7.4. Weryfikacja eksperymentalna metody prognozowania	132
7.5. Analiza porównawcza metod modelowania	143
7.6. Przykłady wykorzystania modelu	154
7.7. Uwagi końcowe	162
8. ZASTOSOWANIE MODELI EMISJI I PROPAGACJI DO PROGNOZOWANIA HAŁASU WIELOPOZIOMOWYCH WĘZŁÓW DROGOWYCH	163
8.1. Wprowadzenie	163
8.2. Założenia i struktura modelu hałasu WWD	164
8.3. Modele propagacji dla segmentu węzła	167
8.4. Weryfikacja eksperymentalna	170
8.5. Przykład zastosowania modelu segmentu węzła	172
8.6. Uwagi końcowe	176
9. PODSUMOWANIE	177
9.1. Uwagi do modelowania źródeł hałasu środowiskowego	177
9.2. Uwagi do modelowania propagacji dźwięku	179
9.3. Uwagi końcowe - kierunki dalszych badań	180
LITERATURA	182

CONTENTS

1. PREFACE	6
1.1. A state-of- the art review	7
1.2. Research objective	11
1.3. Arrangement of the book	13
2. METHODS OF MODELLING IN THE URBAN ACOUSTICS	15
2.1. Introduction	15
2.2. Methods of modelling of environmental noise sources	16
2.3. Methods of modelling of the acoustic field in bounded space	
2.4. Models of acoustic field in urban space	19
2.5. Problems of empirical verification of noise propagation and noise emission models	21

3. MODELLING OF ENVIRONMENTAL NOISE SOURCES	27
3.1. Introduction. Definitions	27
3.2. Model of the environmental noise source	29
3.3. Analytical formulation of the model	31
3.4. Simulation models	35
3.5. Substitute models	37
3.6. Final remarks	50
4. SIMULATION MODEL OF TRAFFIC NOISE	51
4.1. Introduction	51
4.2. Model assumptions. General rule	53
4.3. Simulation model of the ENS structure	56
4.4. Model of elementary source noise	59
4.5. Experimental verification of the model	67
4.6. Final remarks	72
5. SUBSTITUTE MODEL OF ROAD NOISE	73
5.1. Introduction	73
5.2. Assumptions	73
5.3. Source structure model	75
5.4. Model of elementary source noise	76
5.5. Verification of the elementary source noise model	83
5.6. Substitute models of road segment noise	84
5.7. Final remarks	88
6. GEOMETRICAL MODEL OF ACOUSTIC WAVE PROPAGATION IN THE BOUNDED THREE-DIMENSIONAL SPACE	89
6.1. Introduction	89
6.2. Analytical formulation of the geometrical model of propaga- tion	91
6.3. Model of sound reflection and transmission through the plane	97
6.4. Model of sound ray diffraction	98
6.5. Total transmittance	111
6.6. Final remarks	113
7. APPLICATION OF THE GEOMETRICAL MODEL OF ACOUSTIC WAVE PROPAGATION FOR PREDICTING ACOUSTICAL CLIMATE OF URBAN ENVIRONMENT	114
7.1. Introduction	114
7.2. Model of noise propagation in the urban space	114
7.3. Applications of emission and propagation models to predict the road noise within the urban area	128
7.4. Experimental verification of prediction methods	132
7.5. Comparative analysis of the modelling methods	143
7.6. Examples of the models application	154
7.7. Final remarks	162

8. APPLICATION OF SOUND EMISSION AND PROPAGATION MODELS TO MULTI- LEVEL CROSSING (MC) NOISE	163
8.1. Introduction	163
8.2. Assumptions and structure of the MC noise model	164
8.3. Propagation models for the MC segment	167
8.4. Experimental verification	170
8.5. Example of application of the MC segment model	172
8.6. Final remarks	176
9. SUMMARY	177
9.1. Remarks about modelling environmental noise sources	177
9.2. Remarks about modelling sound propagation	179
9.3. Final remarks - further research	180
LITERATURE	182

PRACE NAUKOWE INSTYTUTU TELEKOMUNIKACJI I AKUSTYKI
(wydane w latach 1991–1994)

- Nr 67, Monografie nr 33, K. Sachse, *Analiza i właściwości linii transmisyjnych i falowodów o wielu warstwach dielektrycznych i półprzewodnikowych*, Wrocław 1991
- Nr 68, Konferencje nr 22, *III Szkoła Naukowa Intensometrii Akustycznej*, Wrocław 1991
- Nr 69, Monografie nr 34, T. Więckowski, *Loop antenna in the electromagnetic field metrology*, Wrocław 1992
- Nr 70, Monografie nr 35, A. Dobrucki, *Numeryczne modelowanie układu drgającego głośnika magnetoelektrycznego cewkowego*, Wrocław 1992
- Nr 71, Monografie nr 36, K. M. Abramski, *Metody analizy, kontroli i synchronizacji częstotliwości promieniowania laserów gazowych*, Wrocław 1993
- Nr 72, Monografie nr 37, T. W. Więckowski, *Badania odporności elektronicznych na impulsowe narażenia elektromagnetyczne*, Wrocław 1993
- Nr 73, Monografie nr 38, A. Prałat, *Zastosowanie pól elektromagnetycznych w.c.z. do badania niejednorodności ośrodka skalnego*, Wrocław 1993
- Nr 74, Konferencje nr 23, *V Sympozjum Inżynierii i Reżyserii Dźwięku*, Wrocław 1993
- Nr 77, Monografie nr 41, R. Makowski, *Wybrane zagadnienia ślepego rozplatania sygnałów udarowych*, Wrocław 1994

Cena zł 43 000,-

