

Na prawach rękopisu

INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI I AKUSTYKI
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Dział A
Akustyka

Raport nr

MODEL SYMULACYJNY DO ESTYMACJI
POZIOMU HAŁASU POJAZDÓW
PORUSZAJĄCYCH SIĘ W SWOBODNYM
STRUMIENIU RUCHU

Barbara Rudno-Rudzińska
PRACA DOKTORSKA

Promotor: doc. dr inż. Janusz Zalewski

Słowa kluczowe: model symulacyjny
hałas strumienia ruchu

Magazyn
KOWALE

Mgr inż. Barbara Rudno-Rudzińska

ŚRODOWISKOWE LABORATORIUM BADAWCZE

HAŁASÓW I WIBRACJI

Instytut Telekomunikacji i Akustyki

Politechniki Wrocławskiej

ul. Wybrzeże Wyspiańskiego

WROCŁAW

SPIS TREŚCI

1. WSTEP.....	3
1.1. Wprowadzenie.....	3
1.2. Hałasy komunikacyjne.....	4
1.3. Metody szacowania parametrów hałasów komuni- kacyjnych.....	5
1.4. Cel i podstawowe założenia pracy.....	7
1.4.1. Wstęp.....	7
1.4.2. Cel pracy.....	8
1.4.3. Założenia.....	8
1.5. Układ pracy.....	9
1.6. Wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń.....	10
2. MODEL SYMULACYJNY.....	15
2.1. Analityczne sformułowanie problemu.....	15
2.1.1. Uwagi wstępne.....	15
2.1.2. Opis sytuacji drogowej.....	15
2.1.3. Reguły i parametry modelu.....	16
2.1.3.1. Uwagi wstępne.....	16
2.1.3.2. Reguły modelu.....	17
2.1.3.3. Parametry modelu.....	24
2.1.3.4. Struktura modelu.....	25
2.2. Dobór reguł i wyznaczenie parametrów modelu.....	25
2.2.1. Uwagi wstępne.....	25
2.2.2. Plan badań eksperymentalnych.....	25
2.2.3. Metodyka pomiaru i analizy.....	29
2.2.3.1. Układ pomiarowy.....	29
2.2.3.2. Metody analizy danych.....	31
2.2.4. Wyniki Eksperymentów I	36
2.2.4.1. Wyniki Eksperymentu I.1.....	36
2.2.4.2. Wyniki Eksperymentu I.2.....	38
2.2.4.3. Wyniki Eksperymentu I.3.....	40
2.2.4.4. Wyniki Eksperymentu I.4.....	41
2.2.5. Wnioski.....	47
2.2.6. Reguła generalna RG1 i jej parametry.....	48

3. WERYFIKACJA MODELU.....	50
3.1. Wprowadzenie.....	50
3.2. Oszacowanie błędów estymacji parametrów hałas.....	50
3.2.1. Oszacowanie błędu pomiaru eksperymen- talnego.....	50
3.2.1.1. Wprowadzenie.....	50
3.2.1.2. Eksperymenty II.....	53
3.2.1.3. Wnioski i podsumowanie Ekspery- mentów II.....	66
3.2.2. Oszacowanie błędu symulacji.....	66
3.2.3. Sformułowanie kryterium weryfikacji..	68
3.3. Eksperymentalna weryfikacja modelu.....	69
3.3.1. Wybór ostatecznego wariantu modelu...	69
3.3.2. Weryfikacja dokładności modelu.....	71
4. PODSUMOWANIE.....	76
4.1. Uwagi dotyczące spełnienia celu pracy oraz podstawowych założeń.....	76
4.2. Możliwości rozszerzenia modelu.....	78
4.2.1. Wstęp.....	78
4.2.2. Przykład rozszerzenia modelu.....	80
4.3. Uwagi końcowe.....	83
Spis literatury.....	84

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Rozwój współczesnej cywilizacji w ostrym świetle postawił problem ochrony naturalnego środowiska, w którym żyje człowiek. W dużych aglomeracjach miejskich istotnym czynnikiem naruszającym środowisko naturalne jest nadmierny poziom hałasów, w tym szczególnie hałasów związanych z ruchem drogowym. Negatywny wpływ tego typu hałasu na człowieka omówiono w wielu pozycjach literaturo-
wych, szersze zatem naświetlenie tego problemu jest w niniejszej pracy zbędne [1,2,3,4,5,6,7].

Przyjmując za pewnik wzrostowy trend rozwoju motoryzacji, przy równoczesnej konieczności obniżenia negatywnych skutków tego rozwoju w zakresie klimatu akustycznego, niezbędne jest odpowiednie projektowanie zarówno układów komunikacyjnych, jak i osiedli mieszkaniowych i budynków, a także ich wzajemnej konfiguracji przestrzennej, aby zminimalizować uciążliwość hałasu komunikacyjnego.

Abstrahując od niezbyt precyzyjnego ustalenia, na obecnym etapie wiedzy, granicznych wartości uciążliwości hałasu, a także miar uciążliwości, można stwierdzić, że niezbędne jest zapewnienie projektantom układów komunikacyjnych i struktur urbanistycznych narzędzia pozwalającego na postawienie prognozy co do przewidywanych parametrów akustyczno-fizycznych hałasu komunikacyjnego.

Badania idące w tym kierunku podjęto w wielu krajach już na przełomie lat 60 i 70 [8,9,10,11,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,24,25,26,27]. W Polsce, mimo podjęcia tego tematu w ośrodku ITB w Warszawie [12,23] oraz w Katedrze Akustyki UAM w Poznaniu [29,33,34], daje się zauważyć relatywne opóźnienie szczególnie w odniesieniu do możliwości symulacyjnego prognozowania hałasów przy krajowej strukturze środków transportowych oraz krajowych rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych układów komunikacyjnych oraz systemów urbanistycznych.

Celowe jest zatem podjęcie prób nad wypełnieniem tej luki, co też w niniejszej pracy uczyniono.

1.2. Hałas komunikacyjny

Rozważając hałas komunikacyjny jako obiektywne zjawisko fizyczne, należy wziąć pod uwagę dwa istotnie różniące się od siebie zespoły czynników kształtujących wynikowe parametry tego hałasu:

- 1) czynniki związane z obiektami emitującymi ten hałas, czyli czynniki związane z źródłem hałasu komunikacyjnego,
- 2) czynniki związane z warunkami propagacji hałasu, czyli czynniki związane z otoczeniem źródła hałasu.

Przed szczegółowym zestawieniem czynników z grupy pierwszej i drugiej celowe jest podanie fizyczno-akustycznych parametrów charakteryzujących wynikowy hałas komunikacyjny, odbierany w dowolnym punkcie półprzestrzeni percepcji hałasu. W niniejszej pracy przyjęto do dalszych rozważań następujące parametry opisujące hałas komunikacyjny:

- poziom równoważny zwany też ekwiwalentnym - L_{eq} [dB(A)] ,
- zespół parametrów pozycyjnych rozkładu chwilowych wartości poziomów - L_p [dB(A)], gdzie: $p \in \{0.9; 0.5; 0.1\}$
- poziom średni - $\langle L \rangle$ [dB(A)]
- odchylenie standardowe rozkładu - σ_L [dB(A)],
- wskaźnik oceny hałasu komunikacyjnego - TNI [dB(A)],
- poziom skażenia hałasem - L_{NP} [dB(A)] .

Dobór parametrów L_{eq} , L_{10} , L_{50} wynikał z faktu posługiwania się nimi w normach oraz obowiązujących regulacjach prawnych dotyczących hałasu komunikacyjnego [2, 104, 105], a także w oparciu o najnowsze badania wskazujące, że parametry TNI, L_{NP} są wskaźnikami oceny uciążliwości hałasu zgodnymi z subiektywnym odczuciem [1]. Należy jednak zaznaczyć, iż nie wyczerpują one wszystkich możliwości opisu fizyczno-akustycznej struktury hałasu, np. nie uwzględniają struktury widmowej hałasu.

Pomijając w niniejszej pracy historyczny przegląd metod prognozowania hałasu komunikacyjnego (gdyż dotyczyły one opisowego sposobu podejścia do zjawiska) celowe jest zasygnalizowanie pewnych rysujących się trendów w najnowszych badaniach dotyczących tego problemu. Należy do nich zaliczyć:

- dążenie do opracowania symulacyjnego modelu prognozującego hałas komunikacyjny, przy zadanym źródle i otoczeniu [8, 9, 10, 17, 18, 20, 21, 29] ,
- oparcie modelu o probabilistyczne wielkości opisujące źródło i deterministyczne ujęcie wpływu otoczenia na warunki propagacji hałasu [17, 26, 27] .

- wykorzystanie technik komputerowych w procesie modelowania [20,21,26,31,34,37,38,39,40] .

Znamienny jest również fakt dających się zauważyć zmian w punkcie ciężkości prowadzonych badań. Przyjmując w dużym uproszczeniu trzy etapy w badaniach hałasów komunikacyjnych, można stwierdzić:

- w etapie I "historycznym" prowadzono głównie badania mające na celu znalezienie w oparciu o wyniki badań empirycznych hałasów komunikacyjnych zależności wiążących wybrany parametr charakteryzujący hałas komunikacyjny (L_{50} , L_{10}) w punkcie obserwacji z podstawowymi parametrami ruchu (natężenie, prędkość) [8,13,19,22,23,24,25].
- w etapie II (aktualnym) złożoność problemów związanych z generacją oraz propagacją hałasu komunikacyjnego, wyraźnie odrębny charakter zjawisk związanych z generacją oraz propagacją, a także tendencja do tworzenia modeli symulacyjnych spowodowały wykształcenie się równoległych nurtów badawczych:
 - 1) prace mające na celu sformułowanie szczegółowego i wiarygodnego opisu źródła hałasu komunikacyjnego bez uwzględnienia wpływu otoczenia (propagacja w półprzestrzeni otwartej) [17,18,24,26,34,37,38],
 - 2) badania dotyczące zjawisk towarzyszących propagacji fali akustycznej w przestrzeni, a więc zjawisk związanych z pochłanianiem w gruncie, rozproszeniem, odbiciem, ekranowaniem, przy założeniu, że charakterystyki akustyczne źródła są znane [41-58],
- w etapie III (przyszłościowym) należy przewidywać uzyskanie wiarygodnego i zweryfikowanego empirycznie modelu emisji hałasu komunikacyjnego przez źródło oraz przystąpienie do jego uogólnienia o czynniki związane z otoczeniem (pochłanianie w gruncie, rozproszenie, odbicia, ekranowanie, dyfrakcja) [31,35,36,40].

W świetle powyższego podziału niniejsza praca należy do etapu II.1, główne zatem założenia metodologiczne przyjęte w pracy podporządkowano celom realizowanym w tym etapie.

1.3. Metody szacowania parametrów hałasów komunikacyjnych

W literaturze z lat 70 można znaleźć szereg prób analitycznego określenia związków pomiędzy sytuacją ruchową na odcinku układu

komunikacyjnego a wytwarzanym poziomem hałasu komunikacyjnego w wybranym punkcie obserwacji. Problemem tym zajmowali się: Johnson i Sanders [8], Rathe [9], Kurze [10,11], Blitz [15], Takagi i inni [18], Blandamura i Spagnolo [20], Yeow [17,27], Makarewicz [29,33,34], Ohita [26], Diggory i Oakes [40].

W metodologicznym ujęciu tego zagadnienia można wyróżnić dwie wyraźne tendencje:

Przyjmowanie prostego deterministycznego modelu swobodnego ruchu na prostym odcinku komunikacyjnym. W modelach tych nieskończona liczba punktowych niekoherentnych źródeł hałasu porusza się ze stałą prędkością, w stałych równych odstępach promieniając taką samą moc akustyczną [8,9,10,11,15,20]. Modele te umożliwiają sformułowanie analitycznych zależności pomiędzy parametrami ruchu uwzględnionymi w modelu a wynikowym parametrem określającym hałas komunikacyjny w punkcie obserwacji. Najczęściej przyjmowano jako parametr hałasu poziom średni [8,9] lub poziom quasimaksymalny [10,11,15,20]. Przy formułowaniu analitycznych zależności wykorzystywano znane w literaturze prawidłowości dotyczące propagacji fali akustycznej w zadanej przestrzeni.

Przyjmowanie znacznie bliższych rzeczywistości modeli ruchu na odcinku drogi, tzn. z uwzględnieniem probabilistycznego charakteru składu pojazdów pojawiających się na odcinku obserwacji, odstępów pomiędzy kolejnymi pojazdami, mocy akustycznej poszczególnych pojazdów oraz prędkości przemieszczania się wzdłuż odcinka [17,18,27,26,32,34].

Z rozważań zawartych w literaturze wynika, że w początkowej fazie formułowania modeli tej grupy przyjmowano najczęściej tylko jedną charakterystykę probabilistyczną (np. rozkład odstępów pomiędzy kolejnymi pojazdami) [10,11,17,27]. Pozostałe parametry przyjmowano w ujęciu deterministycznym i formułowano analityczną zależność pozwalającą wyliczyć syntetyczny parametr opisujący hałas strumienia w punkcie obserwacji.

Równoczesne uwzględnienie wszystkich charakterystyk probabilistycznych parametrów ruchu implikuje tworzenie modeli czysto symulacyjnych z ograniczeniem związków deterministycznych wyłącznie do propagacji fali akustycznej w otoczeniu.

W najnowszych pozycjach literaturowych przeważa tendencja do tworzenia modeli z uwzględnieniem pełnego zestawu probabilistycznych charakterystyk opisujących sytuację w ruchu na odcinku,

proponowane zatem modele mają charakter symulacyjny i w ich praktycznej implementacji wykorzystuje się techniki komputerowe¹ [34, 37, 38, 39, 40].

Omówione powyżej modele dotyczą w zasadzie wyłącznie opisu źródła hałasu i w świetle przyjętej w tytule tezy pracy stanowią główny przedmiot zainteresowania. Celowe jest jednak przytoczenie najnowszych propozycji modeli wchodzących w przyszłościowy etap (por. podział na etapy przytoczony w rozdziale 1.2), gdzie przewiduje się uwzględnienie wpływu źródła i otoczenia. Przykładem jest model zaproponowany przez Makarewicza [35, 36], gdzie opis źródła jest zgodny z przedstawionymi powyżej metodami modelowania przy czym uzupełniono go o reguły analityczne wiążące poziom ekwiwalentny hałasu generowanego przez źródło z wpływem otoczenia.

1.4. Cel i podstawowe założenia pracy

1.4.1. Wstęp

Z przytoczonych w poprzednim rozdziale tendencji w modelowaniu i prognozowaniu hałasu oraz w oparciu o podane tam przykłady stosowanych modeli można sformułować następujące wnioski:

1) Modele analityczne wymagają przyjęcia szeregu szczegółowych założeń upraszczających opis sytuacji w ruchu, co w konsekwencji prowadzi do istotnych rozbieżności między modelem a rzeczywistą sytuacją. Przykładem może być model Kurze'a [10, 11], gdzie przyjęto odbiegające od rzeczywistości założenia o stałej równej prędkości wszystkich pojazdów i stałej mocy akustycznej pojazdów.

Próba zbliżenia modelu do rzeczywistej sytuacji poprzez wprowadzenie wielkości probabilistycznych komplikuje zależności analityczne, co w skrajnym przypadku - np. w przypadku wprowadzenia kilku charakterystyk probabilistycznych - podważa celowość stosowania modeli analitycznych i skłania do przyjmowania modeli symulacyjnych. Dodatkową wadą modeli analitycznych jest uzyskiwanie kon-

¹ Symptomatycznym potwierdzeniem tej tendencji jest informacja przytaczana w podręczniku A. Aleksandra i innych [21] o posiadaniu przez wiele urzędów stanowych w USA symulacyjnych programów komputerowych prognozujących poziom hałasu komunikacyjnego. Nie podano jednak bliższych danych dotyczących merytorycznej istoty tych programów.

kretnego parametru opisującego hałas bez możliwości wygenerowania zestawu parametrów, co zapewniają modele symulacyjne.

Niewątpliwą zaletą modeli analitycznych, a w szczególności wnikliwych rozważań związanych z nimi, jest wyświetlenie charakteru zjawisk towarzyszących powstawaniu hałasu komunikacyjnego.

Należy również zaznaczyć, że wprawdzie w najnowszych pracach punkt ciężkości położony jest na modele probabilistyczne, to jednak u podstaw tworzenia tych modeli znajdują się metodologiczne i teoretyczne dokonania związane z modelami deterministycznymi.

1.4.2. Cel pracy

Uwzględniając główną tezę pracy zawartą w temacie oraz dotychczasowy stan badań w zakresie modelowania i prognozowania hałasów komunikacyjnych ustalono następujące cele pracy:

1. Podanie symulacyjnego modelu prognozującego parametry hałasu komunikacyjnego dla swobodnego strumienia ruchu przy przyjęciu opisu sytuacji drogowej w kategoriach probabilistycznych.
2. Ustalenie typu oraz parametrów rozkładów występujących w modelu dla typowych w kraju warunków ruchu drogowego.
3. Zweryfikowanie zaproponowanego modelu w oparciu o wiarygodną statystycznie liczbę sytuacji drogowych.

1.4.3. Założenia

W procedurach prowadzących do osiągnięcia celu pracy przyjęto następujące założenia:

- Z 1. Model dotyczy wyłącznie źródła hałasu komunikacyjnego, rozważania zatem ograniczono do przypadku propagacji fali akustycznej w przestrzeni otwartej,
- Z 2. Model opisuje sytuację drogową na odcinku międzywęzłowym z dala od skrzyżowań oraz przejść dla pieszych,
- Z 3. Parametry wejściowe modelu powinny być zbliżone do parametrów stosowanych przy projektowaniu dróg i arterii komunikacyjnych, natomiast jako parametry wyjściowe przyjęto zbiór parametrów podany w rozdziale 1.2,
- Z 4. Struktura modelu powinna zapewniać możliwość uwzględnienia w przyszłości wpływu otoczenia na wypadkowy poziom hałasu w punkcie obserwacji.

Przyjęte założenia nie mają charakteru arbitralnego, lecz wynikają z tezy pracy (Z1 i Z2), z próby ukierunkowania modelu na zastosowanie praktyczne (Z3) oraz z konieczności dostosowania modelu do przyszłościowych tendencji (Z4).

1.5. Układ pracy

Praca składa się z czterech głównych rozdziałów oraz spisu literatury.

W rozdziale wstępnym (rozdział 1) podano skrótowy przegląd dotychczasowych metod i tendencji w prognozowaniu hałasów komunikacyjnych oraz wykazano wyraźne grupowanie zainteresowań badawczych wokół modeli symulacyjnych. W rozdziale tym sformułowano również podstawowe cele pracy oraz podano główne założenia.

W rozdziale 2 w oparciu o metodę generatywną sformułowano reguły oraz strukturę modelu, uzupełniając je o szczegółowe założenia modelu. W końcowej części rozdziału zestawiono wykaz problemów teoretycznych i eksperymentalnych koniecznych do rozwiązania w pracy.

Rozdział 3 stanowiący zasadniczą część pracy poświęcono sformułowaniu kryterium weryfikacji modelu, metodom szacowania błędów pomiaru i symulacji oraz eksperymentalnemu doborowi parametrów występujących w stosowanych technikach pomiarowych. W rozdziale tym zamieszczono opis i wyniki zasadniczych eksperymentów pomiarowych i symulacyjnych. W końcowej części rozdziału dokonano ostatecznego sformułowania modelu oraz podano zespół konkretnych wartości parametrów stosowanych w modelu.

W podsumowaniu (rozdział 4) podano ograniczenia stosowalności zaproponowanego modelu oraz kierunki jego dalszego rozbudowywania i modyfikacji. Zamieszczono konkretny przykład modyfikacji modelu, umożliwiający uwzględnienie nie tylko wpływu źródła na generowany hałas w punkcie obserwacji (co było istotą rozważanego modelu), lecz również wpływ elementów otoczenia dla prostego układu urbanistycznego. W rozdziale tym podano elementy pracy, które zdaniem autora miały cechy oryginalnego wkładu do problematyki pomiaru i prognozowania hałasów komunikacyjnych oraz do formułowania modeli symulacyjnych w tym zakresie.

W związku z zalecaną tendencją do ograniczania objętości prac doktorskich w ostatecznej redakcji pracy zamieszczono opis tylko eksperymentów zasadniczych, rezygnując z przytaczania szeregu

wykonanych eksperymentów wstępnych. Pominęto również omówienie zagadnień szeroko znanych i cytowanych w literaturze (np. wybór parametrów opisujących sytuację w ruchu oraz prognozowanych parametrów hałasu, stosowane dotychczas techniki i metody pomiarowe, opracowane programy komputerowe itp), skupiając się na elementach stanowiących pośrednio lub bezpośrednio oryginalne dokonania autora.

1.6. Wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń (w kolejności pojawiania się w tekście)

L_{eq}	- poziom równoważny
L_p	- parametr pozycyjny rozkładu
$\langle L \rangle$	- poziom średni
$\langle \rangle_N$	- symbol oznaczający uśrednianie w zbiorze N-elementowym
σ_L	- odchylenie standardowe rozkładu $p(L)$
TNI	- wskaźnik oceny hałasu
L_{NP}	- poziom skażenia hałasem
M	- liczba linii ruchu
m	- indeks linii ruchu
V_i	- prędkość ruchu i-tego pojazdu
τ_i	- interwał czasowy między pojawieniem się kolejnych pojazdów
D	- odległość punktu obserwacji od krawędzi jezdni
RG	- zbiór reguł generalnych
RW	- zbiór reguł wewnętrznych
RO	- zbiór reguł organizacyjnych
RT	- zbiór reguł terminalnych
S	- zbiór pojazdów samochodowych, zbiór źródeł punktowych
i	- indeks w zbiorze S
K	- zbiór klas pojazdów
k	- indeks w zbiorze K
$\in$	- znak należenia do zbioru
R	- zbiór przedziałów prędkości, współczynnik odbicia
r	- indeks w zbiorze R
ΔV	- szerokość przedziałów prędkości
$L_{oi,k}$	- poziom hałasu generowanego w punkcie odniesienia przez i-te źródło punktowe k-tej klasy, poruszające się z prędkością V_i

- o - indeks punktu odniesienia $r_o = 1 \text{ m}$
- $L_{oi,k,r}$ - poziom hałasu generowanego w punkcie odniesienia przez i -te źródło punktowe k -tej klasy, poruszające się z prędkością należącą do przedziału r
- $p_{k,r}(L_o)$ - rozkład poziomów hałasu generowanego przez pojazdy k -tej klasy, poruszające się z prędkościami należącymi do przedziału prędkości r
- a_k, b_k - empiryczne współczynniki regresji liniowej zależne od klasy pojazdów
- $I_{oi,k}$ - natężenie hałasu odpowiadające poziomowi $L_{oi,k}$
- d_m - prostopadła odległość punktu obserwacji od m -tej linii ruchu
- x_i - odległość i -tego źródła punktowego od prostopadłego rzutu punktu obserwacji O na linię ruchu
- W_n - zbiór źródeł punktowych znajdujących się na odcinku obserwacji w momencie t_n
- $\text{Sup}W_n$ - kres górny zbioru W_n
- $p(L)$ - rozkład chwilowych wartości poziomu hałasu w punkcie obserwacji
- Δt - czas dyskretyzacji modelu, okres próbkowania sygnału
- x_p, x_k - granice odcinka obserwacji
- T_s - okres obserwacji sygnału
- t_n - dyskretne momenty czasowe
- N - liczba dyskretnych wartości chwilowych poziomu generowanych przez model, liczba próbek
- Q - natężenie ruchu
- $S_b S$ - podzbiór zbioru S
- $p(k)$ - dyskretny rozkład częstości występowania pojazdów w klasach k
- $p_k(V)$ - rozkład prędkości ruchu pojazdów k -tej klasy

- $V_{d,k} \ V_{g,k}$ - odpowiednio najmniejsza i największa prędkość ruchu pojazdów klasy k
- $\emptyset$ - zbiór pusty
- $D(L)$ - dystrybuanta rozkładu $p(L)$
- $r_{L,V'}$ - empiryczny współczynnik korelacji wzajemnej między L i $V' = \log V$
- $\left. \begin{matrix} 2 \Delta a_k \\ 2 \Delta b_k \end{matrix} \right\}$ - szerokość przedziału ufności odp. współczynnika a_k i b_k
- α - poziom ufności
- $L_{o,k,r}, \ \sigma_{L_{o,k,r}}$ - poziom średni oraz odchylenie standardowe rozkładu $p_{k,r}(L_o)$
- $p_{k,V}(L_o)$ - rozkład poziomów hałasu generowanego przez pojazdy k -tej klasy poruszające się z prędkością V
- θ - dowolny parametr hałasu ze zbioru:
 $\{L_{eq}, L_{10}, L_{50}, L_{90}, TNI, L_{NP}\}$
- $\hat{\theta}_i, \ \tilde{\theta}_i$ - estymatory parametru θ wyznaczone odpowiednio na podstawie pomiaru i symulacji dla i -tej sytuacji w ruchu
- i - indeks oznaczający sytuację w ruchu
- $\Delta \hat{\theta}_i, \ \Delta \tilde{\theta}_i$ - estymator błędu oszacowania parametru θ na podstawie pomiaru i symulacji
- $\langle \Delta(\hat{\theta}, \tilde{\theta}) \rangle, \ S(\hat{\theta}, \tilde{\theta})$ - odp. estymator wartości średniej i odchylenia standardowego rozkładu $p(\delta(\hat{\theta}, \tilde{\theta}))$
- $\langle \delta \Psi_i \rangle, \ \sigma_{\Psi_i}$ - wartość średnia i odchylenie standardowe rozkładu błędu modelu $p_i(\delta \Psi)$
- $\delta \Psi_i$ - błąd modelu
- $\delta_i(\hat{\theta}, \tilde{\theta})$ - różnica między estymatorami $\hat{\theta}$ i $\tilde{\theta}$
- $p_i(\hat{\theta}), \ p_i(\tilde{\theta})$ - empiryczny rozkład estymatora $\hat{\theta}$ i $\tilde{\theta}$
- $\delta_i \hat{\theta}, \ \delta_i \tilde{\theta}$ - błąd oszacowania parametru θ odp. na podstawie pomiaru i symulacji

- $p_i(\delta\bar{\theta}), p_i(\delta\check{\theta})$ - odp. rozkład błędu $\delta_i\bar{\theta}$ i $\delta_i\check{\theta}$
- $\sigma_{\delta_i} \text{ i } \sigma_{\check{\delta}_i}$ - odp. odchylenie standardowe rozkładu $p_i(\delta\bar{\theta})$
 $p_i(\delta\check{\theta})$
- $\mu_{\delta_i}, \sigma_{\delta_i}$ - wartość średnia i odchylenie standardowe rozkładu
 $p(\delta(\bar{\theta}, \check{\theta}))$
- $s_{\delta_i}, s_{\check{\delta}_i}$ - estymatory odp. σ_{δ_i} i $\sigma_{\check{\delta}_i}$
- $\langle \Delta \Psi_i \rangle, s_{\Psi_i}$ - estymatory odp. $\langle \delta \Psi_i \rangle$ i σ_{Ψ_i}
- γ - współczynnik tłumienia fali akustycznej przez grunt

2. MODEL SYMULACYJNY

2.1. Analityczne sformułowanie problemu

2.1.1. Uwagi wstępne

W oparciu o analizę stanu badań nad hałasami komunikacyjnymi (rozdział 1.2. - 1.3) oraz założenia przyjęte w rozdziale 1.4. zdecydowano zastosować w pracy dyskretny model probabilistyczny i przeprowadzić jego symulację za pomocą komputera. Punktem wyjścia do ściślejszego sformułowania tego modelu jest ustalenie dającego się sformalizować opisu sytuacji na odcinku drogi oraz przyjęcie dodatkowych założeń ograniczających lub upraszczających, tak aby model był eksperymentalnie weryfikowalny. Zarówno opis sytuacji na odcinku, jak i założenia omówiono w następnych rozdziałach.

2.1.2. Opis sytuacji drogowej

Szkic sytuacji w ruchu na odcinku drogi przedstawiono na rys. 2.1. Przyjęto, że:

- Z5 - na skończonym odcinku drogi o gładkiej powierzchni jest M niezależnych pasów ruchu,
- Z6 - pojazdy znajdujące się na m -tym pasie poruszają się wzdłuż jego osi tworząc strumień o swobodnym przepływie ciągłym,
- Z7 - na odcinku drogi pojazdy nie zmieniają pasa ruchu, lecz mogą się wyprzedzać,
- Z8 - na odcinku drogi poszczególne pojazdy poruszają się ze stałą własną prędkością V_i , a zbiór wartości $\{V_i\}$ stanowi pewien rozkład,
- Z9 - odstęp czasowy ΔT_i pomiędzy pojawieniem się kolejnych pojazdów w dowolnym przekroju jest zmienną losową,
- Z10 - pojazdy poruszające się po odcinku drogi dają się sklasyfikować w skończoną liczbę klas.

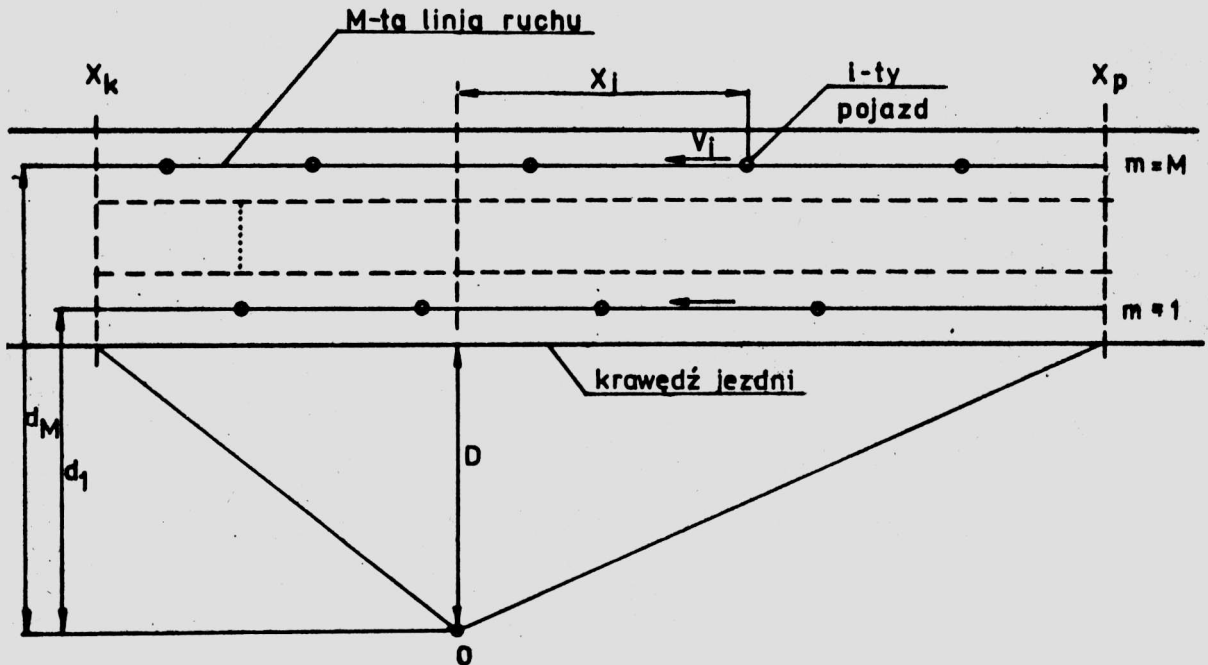
Przed ostatecznym sformułowaniem modelu należy przyjąć założenia pozwalające na ustalenie zależności pomiędzy sytuacją w ruchu na odcinku drogi a poziomem hałasu generowanego przez strumień ruchu w wybranym punkcie obserwacji:

- Z11 - pojazdy samochodowe stanowią punktowe, wszechkierunkowe nieskorelowane źródła hałasu umieszczone na płaskiej odbijającej powierzchni o stałym współczynniku

odbicia [18,27,16,61,62,63,64],

Z12 - natężenie hałasu generowane przez pojedynczy pojazd zależy od przynależności danego pojazdu do k -tej klasy oraz jego prędkości [66,67,68,69,70,73],

Z13 - punkt obserwacji O znajduje się w arbitralnie przyjętej odległości D od krawędzi odcinka drogi (rys. 2.1).



Rys. 2.1 Szkic sytuacji drogowej

2.1.3. Reguły i parametry modelu

2.1.3.1. Uwagi wstępne

W dalszej części pracy regułami będziemy nazywać związki funkcyjne lub probabilistyczne (stanowiące w zapisie reguł formę zdaniową [103]) pomiędzy wielkościami opisującymi sytuację w ruchu na odcinku drogi a wielkościami opisującymi generowany hałas (reguły generalne RG), rozkłady opisujące poszczególne wielkości, co do których przyjęto założenie, że są zmiennymi losowymi (reguły wewnętrzne RW), reguły organizacyjne modelu R0 symulujące ruch na odcinku (w tym reguły czasowe) oraz zależności pomiędzy parametrami hałasu a jego rozkładem poziomów (reguły terminalne RT).

Parametrami modelu będziemy nazywać stałe współczynniki występujące w regułach (parametry reguł PR), wielkości wprowadzane do modelu jako dane (parametry wejściowe PW) oraz parametry generowane przez model (parametry terminalne PT).

2.1.3.2. Reguły modelu

Reguły generalne - RG

Do zbioru reguł generalnych zaliczono:

Regułę RG1, wiążąca poziom $L_{oi,k}$ hałasu generowanego przez i -te źródło punktowe, należące do k -tej klasy z jego prędkością ruchu V_i , w punkcie odniesienia $r_0 = 1$ m.

W oparciu o wyniki badań hałasu wytwarzanego przez poruszające się pojazdy samochodowe przeprowadzonych zgodnie z zaleceniem ISO/R-362 [60,61,62,63,74] oraz dla swobodnego strumienia pojazdów w rzeczywistych warunkach drogowych [65,66,67,68,69,70,71,72,73] przyjęto dwa warianty reguły RG1 - wariant quasideterministyczny RG1d oraz wariant probabilistyczny RG1p.

Regułę RG1 sformułowano następująco:

$$RG1: \left\{ \begin{array}{l} RG1d: \bigwedge_{i \in S} \bigwedge_{k \in K} \bigvee_{f: S \rightarrow K} \{L_o: [L_{oi,k} = a_k \log V_i + b_k]\} \quad (2.1a) \\ RG1p: \left[p(L_o) \in N(\mu_{L_o}, \sigma_{L_o}) \bigwedge_{i \in S} \bigwedge_{k \in K} \bigvee_{f: S \rightarrow K} \bigwedge_{r \in R} \right] \Rightarrow \quad (2.1b) \\ \Rightarrow \{L_o: [L_{oi,k,r} : p_{k,r}(L_o)]\} \end{array} \right.$$

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

S - zbiór pojazdów samochodowych,

K - zbiór klas pojazdów,

R - zbiór przedziałów prędkości,

ΔV - szerokość przedziału prędkości,

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

Regułę RG1d przyjęto opierając się na wynikach badań przedstawionych przez Lewisa [67,69], który wykazał, że dla pojazdów po-

ruszających się w swobodnym strumieniu ruchu istnieje silna zależność pomiędzy poziomem generowanego hałasu a prędkością jazdy (współczynnik korelacji $r=0.82$ dla pojazdów klasy lekkiej oraz $r=0.64$ dla pojazdów klasy ciężkiej) [67]. Zależności analogiczne do (2.1a) przyjmowano również w pracach [31 i 34] dotyczących symulacyjnego generowania parametrów hałasu komunikacyjnego.

Badania eksperymentalne przeprowadzone dla pojedynczych pojazdów wykazały, że współczynniki a_k i b_k w silnym stopniu zależą od takich parametrów pojazdów, jak stan techniczny, obciążenie, obroty silnika [60-63], z kolei badania przeprowadzone dla strumienia pojazdów wykazały, że współczynniki te zależą również od warunków ruchu, prędkości ruchu oraz przyjętego podziału pojazdów na klasy [66,67,69,70].

Można zatem stwierdzić, że wartości współczynników a_k i b_k zależące od tak wielu czynników mają w praktyce charakter zmiennej losowej. Z tego powodu przyjmując w pracy zależność 2.1a jako regułę generalną nazwano ją wariantem quasideterministycznym (tzn. reguła ma charakter deterministyczny, a parametry reguły wyznacza się metodami probabilistycznymi).

Równocześnie w związku z powyższymi uwagami zdecydowano się rozważyć wariant probabilistyczny RG1p (2.1b), zakładając, że istnieje pewien rozkład poziomów $p_{k,r}(L_0)$ hałasu generowanego przez pojazdy należące do k -tej klasy, poruszające się z prędkościami należącymi do r -tego przedziału prędkości.

Regułę RG2, określającą natężenie $I_{m,i}$ hałasu generowanego w punkcie obserwacji O w momencie t_n przez i -te źródło punktowe poruszające się po m -tej linii:

$$RG2: \bigwedge_{n \in \{1, N\}} I_{m,i}(t_n) = I_{oi,k} / [d_m^2 + x_i^2(t_n)] \quad (2.2)$$

gdzie: $I_{oi,k}$ - natężenie hałasu generowanego w punkcie odniesienia przez i -te źródło punktowe według reguły RG1 (2.1),

d_m - prostopadła odległość punktu obserwacji O od m -tej linii ruchu,

x_i - odległość i -tego źródła punktowego na linii m od prostopadłego rzutu punktu obserwacji O na linię m (rys. 2.1).

Regułę RG3, wyznaczającą wypadkowe natężenie hałasu generowanego przez wszystkie źródła punktowe znajdujące się na m-tej linii odcinka w punkcie obserwacji 0:

$$\text{RG3: } \bigwedge_{n \in \{1, N\}} I_m(t_n) = \sum_{i=1}^{\sup W_n} I_{m,i}(t_n) \quad (2.3)$$

gdzie: $I_{m,i}(t_n)$ - wyznaczone z reguły RG2 (2.2)

$\sup W_n$ - liczba źródeł punktowych znajdujących się na odcinku obserwacji m w momencie t_n (patrz reguła RO3)

Przy formułowaniu reguły RG2 i RG3 uwzględniono przyjęte uprzednio założenie Z11.

Regułę RG4 - generującą rozkład poziomu hałasu $p(L)$ wytwarzanego w punkcie obserwacji 0 przez źródła punktowe poruszające się po M niezależnych liniach ruchu:

$$\text{RG4: } p(L) = \prod_{m=1}^M p_m(L) \quad (2.4)$$

gdzie: $p_m(L)$ - rozkład poziomów wypadkowego hałasu pochodzącego od strumienia źródeł punktowych poruszających się po m-tej linii (wyznaczony z reguły RW4 (2.4)).

Regułę RG4 przyjęto w oparciu o prace¹ [75,76] uwzględniając przyjęte założenie Z5, że poszczególne linie ruchu są niezależne.

Reguły organizacyjne - RO

Reguły organizacyjne RO nie mają charakteru ścisłych zależności analitycznych, lecz są zbiorem zasad organizujących działanie modelu, wyliczanie poszczególnych parametrów i wielkości oraz podejmowanie decyzji co do dalszego toku działań modelu. Przy formułowaniu reguł organizacyjnych symulujących ruch na odcinku drogi opierano się na pracach: Millera [77], Weissa [78], Gorlougha [79], Levy'ego [80], Varola i innych [81]:

Punktem wyjścia do ustalenia reguł RO jest przyjęcie czasu dyskretyzacji modelu Δt , zwanego też czasem próbkowania modelu, czasu obserwacji T_s oraz granic wyznaczających odcinek obserwacji

¹ Przy implementacji komputerowej modelu wykorzystano algorytm podany przez Kesslera [76].

(x_p, x_k) . (Wartość czasu Δt określono w oparciu o badania eksperymentalne², aczkolwiek ogólność sformułowania modelu pozwala na podstawienie dowolnej wartości.)

Wszystkie operacje w modelu związane z wykonaniem reguł symulujących ruch źródeł punktowych zachodzą dla kolejnych dyskretnych wartości czasu oddalonych od siebie o Δt . Generacja źródeł punktowych, tzn. wygenerowanie dla każdego i -tego źródła odpowiednio interwału czasowego τ_i - reguła RW1 (2.8) - klasy źródła - reguła RW2 (2.9) prędkości V_i - reguła RW3 (2.10) oraz natężenia hałasu I_{o1} w punkcie odniesienia - reguła RG1 (2.1), rozpoczyna się w momencie $t=0$. Stosowanie reguł generalnych RG2 (2.2) i RG3 (2.3) i związana z tym generacja chwilowych wartości poziomu hałasu w punkcie obserwacji oraz rozkładu poziomów hałasu 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 punktowe. Czynności symulacyjne zachodzą do momentu $(t_p + T_g)$, po czym następuje uruchamianie reguł terminalnych i generacja zespołu parametrów terminalnych.

Reguła R01 - generująca początkowe położenie $x_{i+1}(t_{o,i})$ $(i+1)$ -ego źródła punktowego względem położenia $x_i(t_{o,i})$ i -tego źródła. Położenie początkowe pierwszego źródła punktowego w momencie $t=0$ przyjmowane jest arbitralnie jako $x_1 = x_p$.

$$R01: \quad x_{i+1}(t_{o,i}) = x_i(t_{o,i}) + x_{i+1} \tau_{i+1} \quad (2.5)$$

gdzie: $t_{o,i}$ - moment generowania $(i+1)$ źródła punktowego, czyli moment, w którym przy przyjętym czasie dyskretyzacji Δt stwierdzono, że i -ty pojazd przekroczył przekrój początkowy odcinka obserwacji x_p (rys. 2.1),

V_{i+1} - prędkość $(i+1)$ -tego źródła punktowego wygenerowana wg reguły RW3 (2.10),

τ_{i+1} - interwał czasowy, wygenerowany z reguły RW1 (2.8).

² Patrz rozdział 3.2.1.

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

$$RO2: \bigwedge_{n \in \{1, N\}} \{x_i(t_n) = x_i(t_n - \Delta t) - v_i \Delta t\} \quad (2.6)$$

gdzie: $N = T_s / \Delta t$

Reguła RO3, sprawdzająca położenie każdego pojazdu na linii ruchu w momencie t_n oraz wyznaczająca liczbę pojazdów na odcinku obserwacji w momencie t_n :

$$RO3: \bigwedge_{n \in \{1, N\}} \bigwedge_{i \in S} \{x_i(t_n) : [x_i(t_n) \in (x_p, x_k)] \Rightarrow (i \in W_n)\} \quad (2.7)$$

gdzie: $W_n = SbS$, W_n stanowi podzbiór S w sensie podanej reguły implikacyjnej (2.7).

Reguły wewnętrzne RW

Reguła RW1; generująca rozkład $p(\tau_i)$ interwałów czasowych τ_i pojawiania się źródeł punktowych w przekroju początkowym ($x=x_p$) odcinka obserwacji na linii

$$RW1: \bigvee_{p(\tau) \in P(\mu_{\tau_m})} \bigwedge_{i \in W}^m \{\tau_i : p_m(\tau)\} \quad (2.8)$$

gdzie: $P(\mu_{\tau_m})$ - rozkład Poissona o wartości oczekiwanej μ_{τ_m}

$$\mu_{\tau_m} = \frac{1}{Q_m}$$

Q_m - natężenie strumienia źródeł punktowych na linii m .

Regułę RW1 dobrano w oparciu o prace [77,78,83,84,86] przyjmując, że dla typowych warunków krajowych średnie natężenie ruchu nie przekracza 500 poj/h/pas.

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

$$RW2: \bigwedge_{i \in W} \bigvee_{(p(k))} \{p(i \in K) : p(k)\} \quad (2.9)$$

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

Reguła RW3, generująca rozkład prędkości V_1 źródeł punktowych należących do k -tej klasy, poruszających się po m -tej linii [77,78,86]:

$$RW3: \bigvee_{p_k(v) \in N(\mu_{v,k}, \sigma_{v,k})} \bigwedge_{k \in K} \bigwedge_{i \in S} \{v_i : p_k(v)\} \quad (2.10)$$

przy czym $v_i \in \{v_{d,k}, v_{g,k}\}$

gdzie: $v_{d,k} - v_{g,k}$ - odpowiednio najmniejsza i największa prędkość ruchu pojazdów klasy k

Reguła RW4 generująca rozkład poziomu $p_m(L)$ hałasu wytwarzanego przez strumień źródeł punktowych poruszających się po m -tej linii odcinka obserwacji, w okresie obserwacji $(t_p, t_p + T_s)$, przy próbkowaniu w N punktach. W regule uwzględniono wpływ poziomu t_{α}^1 akustycznego w punkcie obserwacji 0 na poziom wypadkowy (warunki 2.11a i b).

$$RW4: \bigvee_{p_m(L)} \bigwedge_{n \in \{1, N\}} \{L_m(t_n) \in p_m(L)\} \quad (2.11)$$

przy czym zachodzi:

$$[(W_n = \emptyset) \wedge (L_m(t_n) < L_z)] \Rightarrow [L_m(t_n) = L_z] \quad (2.11a)$$

$$\bigwedge_{m \in \{1, M\}} \left\{ [(m=1) \Rightarrow (L_z = L_{t\alpha})] \wedge [(m>1) \Rightarrow (L_z = 20)] \right\} \quad (2.11b)$$

gdzie: $L_m(t_n)$ - poziom hałasu w punkcie 0 w momencie t_n ,
 $L_m(t_n) = 10 \log(I_m(t_n))$ (patrz RG3 (2.3))

$L_{t\alpha}$ - poziom t_{α} akustycznego w punkcie 0,

L_z - poziom zerowy,

$W_n = \emptyset$ - na odcinku obserwacji w momencie t_n nie ma żadnego pojazdu

Reguły terminalne RT

Reguły terminalne RT wyznaczają dystrybuantę rozkładu $D(L)$

¹ Założono, że poziom t_{α} akustycznego w punkcie obserwacji 0 jest stały ($L_{\alpha} = \text{const}$).

oraz zbiór parametrów $\{L\} : \{L_{eq}, L, L_{10}, L_{50}, L_{90}, TNI, L_{NP}\}$ charakteryzujących hałas generowany przez swobodny strumień pojazdów w punkcie obserwacji O.

Reguła RT1, wyznaczająca dystrybuantę $D(L)$ rozkładu chwilowych wartości poziomu hałasu $p(L)$, wyznaczonego z reguły RG4:

$$RT1: D(L) = P \{ L(t_n) > L \} \quad (2.12)$$

Reguła RT2, wyznaczająca poziom równoważny hałasu L_{eq} :

$$RT2: L_{eq} = 10 \log \langle I \rangle_N \quad (2.13)$$

gdzie: I - natężenie hałasu w punkcie obserwacji
 $\langle \rangle_N$ - uśrednianie wielkości w zbiorze N -elementowym.

Reguła RT3, wyznaczająca poziom średni hałasu L_{sr} :

$$RT3: L_{sr} = \langle L \rangle_N \quad (2.14)$$

Reguła RT4, wyznaczająca wariancję rozkładu $p(L)$:

$$RT4: \sigma_L^2 = \langle (L(t_n) - \langle L \rangle_N)^2 \rangle_N, \quad n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (2.15)$$

Reguła RT5, wyznaczająca parametry pozycyjne L_p^2 rozkładu poziomu hałasu $p(L)$:

$$RT5: P(L(t_n) \geq L_p) = p, \quad p \in \{0.90; 0.5; 0.1\} \quad (2.16)$$

Reguła RT6, wyznaczająca wskaźnik oceny hałasu TNI:

$$RT6: TNI = 4 L_{10} - 3 L_{90} - 30 \quad (2.17)$$

¹Wyznaczanie według reguły RT wartości są estymatorami punktowymi rzeczywistych parametrów. W dalszej części pracy mówiąc o parametrach hałasu wyznaczonych w procesie symulacji będziemy mieli na myśli estymatory tych parametrów. Błędy estymacji omówiono w rozdziale 3.2.2.

²Parametry pozycyjne rozkładu L_p wyznaczono metodą interpolacji liniowej w oparciu o wyznaczoną wcześniej dystrybuantę rozkładu $D(L)$ (2.12).

Reguła RT7, wyznaczająca poziom skażenia hałasem L_{NP} :

$$RT7: L_{NP} = L_{50} + 2,56 (L_{10} - L_{90}) \quad (2.18)$$

gdzie: L_{10} , L_{50} , L_{90} - parametry pozycyjne rozkładu poziomu hałasu wyznaczone wg RT4 (2.16) odpowiednio dla $p \in \{0,1; 0,5; 0,9\}$.

2.1.3.3. Parametry modelu

Parametry wejściowe modelu

Parametrami wejściowymi modelu PW są:

- PW1: liczba generowanych chwilowych wartości wypadkowego poziomu hałasu w punkcie obserwacji: N ($N = T / \Delta t$, T_s - okres obserwacji)
- PW2: okres próbkowania sygnału hałasu w punkcie obserwacji Δt [s]
- PW3: granice odcinka obserwacji: x_p , x_k [m]
- PW4: liczba linii ruchu - M
- PW5: poziom tła akustycznego w punkcie obserwacji: $L_{t\lambda}$ [dB(A)]
- PW6: natężenie strumienia ruchu na linii m - Q [poj/h]
- PW7: prostopadła odległość punktu obserwacji od m -tej linii : d [m]
- PW8: procentowy udział w strumieniu ruchu pojazdów zakwalifikowanych do klasy pojazdów: osobowych, dostawczych i ciężarowych: p_k , $k \in \{1,2,3\}$ [%]
- PW9: średnia prędkość pojazdów należących do klasy pojazdów: osobowych, dostawczych i ciężarowych: $\langle V \rangle_k$, $k \in \{1,2,3\}$ [km/h]
- PW10: odchylenie standardowe rozkładu prędkości pojazdów osobowych, dostawczych i ciężarowych: $\sigma_{V,k}$ $k \in \{1,2,3\}$ [km/h]
- PW11: najmniejsza oraz największa prędkość, z jaką poruszają się pojazdy każdej klasy na odcinku obserwacji: $(V_{d,k}, V_{g,k})$, $k \in \{1,2,3\}$ [km/h].

Parametry PW6 - PW11 podawane są kolejno dla zadeklarowanej liczby linii ruchu M .

Parametry wyjściowe modelu

Parametrami wyjściowymi modelu są:

- PT1: rozkład chwilowych wartości poziomu hałasu $p(L)$ wytwarzanego przez strumień pojazdów w punkcie obserwacji O , wyznaczony wg RG4 (2.4)
- PT2: dystrybuanta rozkładu poziomu hałasu $D(L)$ - wyznaczona wg RT1 (2.12)

PT3: zbiór parametrów $\{L\}$ charakteryzujących hałas w punkcie obserwacji O wyznaczonych z reguł terminalnych RT:

PT3.1 - poziom równoważny L_{eq}

PT3.2 - poziom średni $\langle L \rangle$

PT3.3 - poziom quasimaksymalny L_{10}

PT3.4 - mediana rozkładu $p(L)$ L_{50}

PT3.5 - poziom quasiminimalny L_{90}

PT3.6 - wskaźnik oceny hałasu TNI

PT3.7 - poziom skażenia hałasem L_{NP}

PT4: odchylenie standardowe σ_L rozkładu $p(L)$

2.1.3.4. Struktura modelu

Na rys. 2.2 pokazano schemat blokowy modelu symulacyjnego szacującego parametry hałasu strumienia ruchu, gdzie uwzględniono podstawowe bloki funkcjonalne oraz następstwa wykonywania reguł.

2.2. Dobór reguł i wyznaczanie parametrów modelu

2.2.1 Uwagi wstępne

Przyjęte analityczne sformułowanie modelu zawiera dwa warianty reguły RG1. Konieczne jest zatem dokonanie doboru reguł, tzn. ustalenie, który z rozważanych wariantów zapewnia lepszą zgodność modelu z rzeczywistymi warunkami. Konieczne jest również ustalenie kryteriów podziału pojazdów na klasy oraz eksperymentalne określenie szeregu parametrów występujących w regułach modelu, gdyż mimo w miarę obszernego oparcia się na danych literaturowych, praktyczne parametry reguł muszą być dostosowane do warunków krajowych.

Przeprowadzenie eksperymentów wymagało również uprzedniego ustalenia technik pomiarowych, umożliwiających równoczesny pomiar hałasu pojazdu, prędkości ruchu oraz jego identyfikację.

2.2.2. Plan badań eksperymentalnych

Celem realizacji zadań postawionych w rozdziale 2.2.1 wykonano następujące badania eksperymentalne:

Eksperyment I.1:

Weryfikacja hipotezy o istnieniu zależności $L = a \lg V + b$ dla pełnego zakresu prędkości użytkowych pojazdu, tzn. z koniecznością zmiany przełożenia skrzyni przekładniowej.

Eksperyment I.2:

Wyznaczenie współczynników a_k i b_k reguły RG1d (2.1a) dla założonych klas pojazdów.

Eksperyment I.3:

Weryfikacja hipotezy o normalności rozkładu poziomu hałasu $p_{k,r}(L_0)$ występującego w regule RG1p (2.1b) oraz wyznaczenie parametrów tego rozkładu dla założonych klas pojazdów oraz przyjętych szerokości przedziałów prędkości ΔV .

Eksperyment I.4:

Weryfikacja hipotezy o normalności rozkładu $p_k(V)$ prędkości ruchu V_1 pojazdów danej klasy k poruszających się w swobodnym strumieniu, występującego w regule RW3 (2.10), oraz wyznaczenie parametrów tego rozkładu dla założonych klas pojazdów.

Eksperyment I.1 przeprowadzono dla czterech pojazdów osobowych (syrena, fiat 125, fiat 126, fiat 126), poruszających się po pustej drodze, przy czym kierowca współpracował w eksperymencie, tzn. przejeżdżał wzdłuż odcinka obserwacji z zadaną stałą prędkością przy określonym przełożeniu skrzyni przekładniowej.

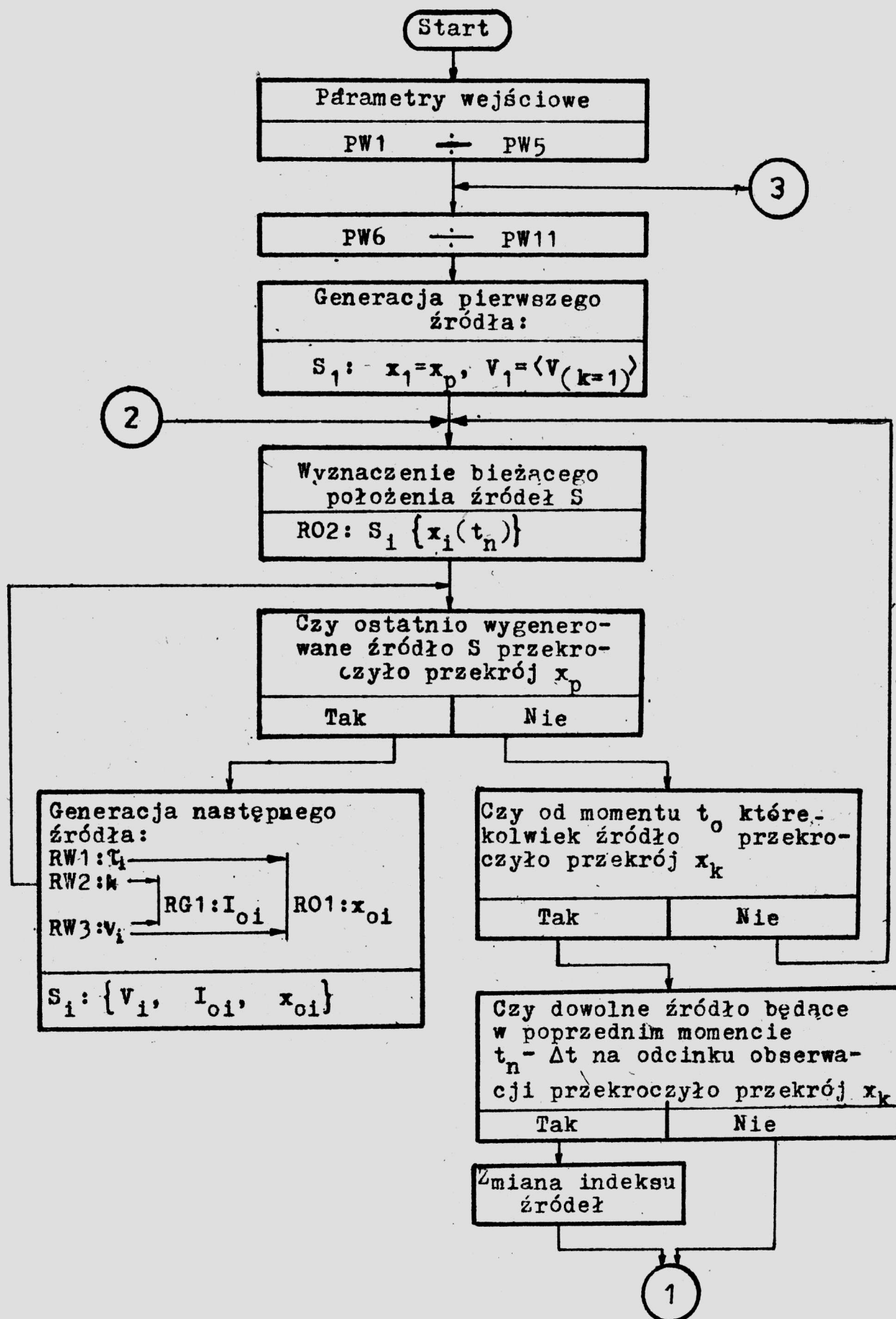
Pozostałe eksperymety przeprowadzono dla sześciu odcinków obserwacji o różnych warunkach ruchu, które można sklasyfikować jako:

- arterie przelotowe w obrębie miasta A_p - 2 odcinki (ograniczenie prędkości do 50 lub 60 km/h),
- arterie wylotowe w obrębie miasta A_w - 2 odcinki (ograniczenie prędkości do 60 lub 70 km/h),
- szosy S_z - 2 odcinki (ograniczenie do 90 km/h).

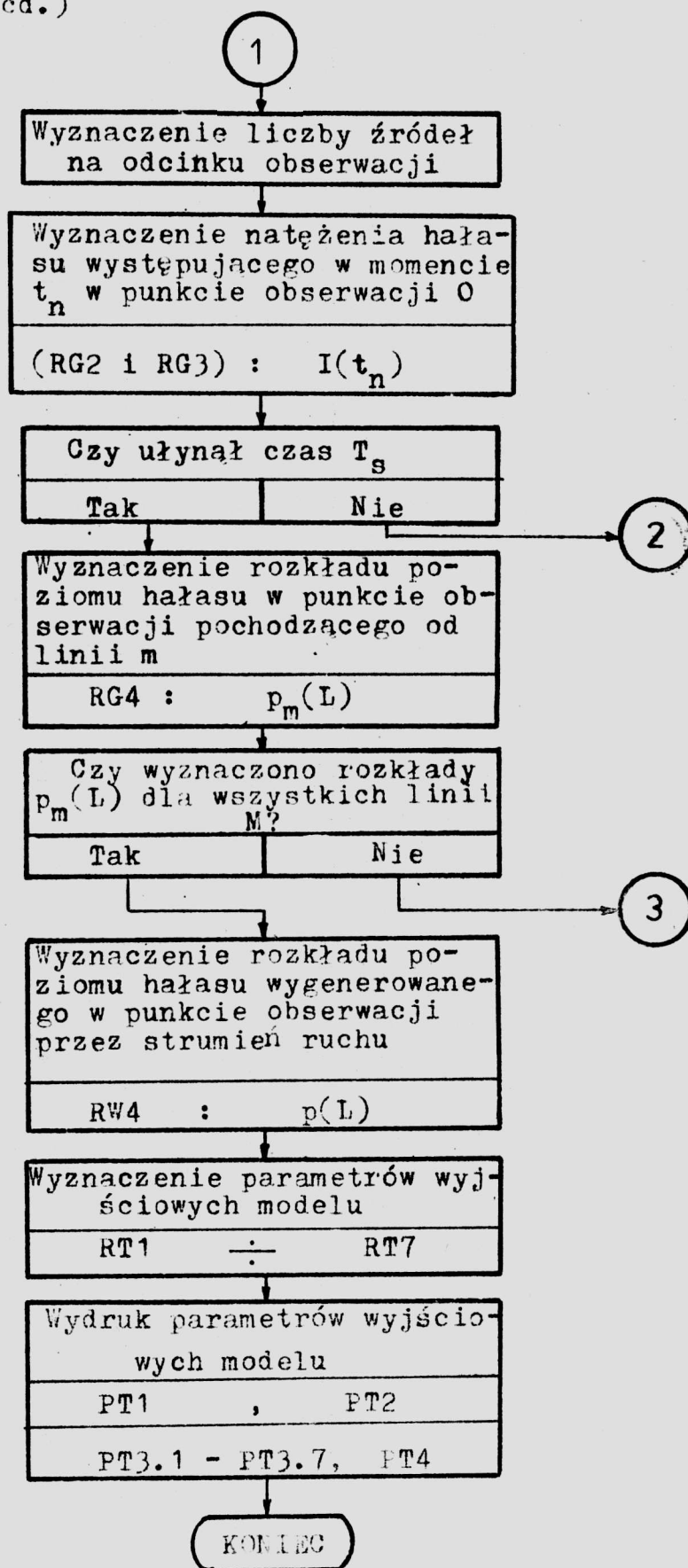
Wybrane odcinki spełniały w przybliżeniu przyjęte w modelu założenia dotyczące sytuacji w ruchu:

- odległe skrzyżowania i przejścia dla pieszych,
- możliwie swobodny przepływ strumienia pojazdów,
- pojazdy poruszają się po prostej, poziomej, asfaltowej drodze,
- odległa zabudowa,
- mały poziom tła akustycznego,
- niewielkie natężenie ruchu, tak że hałas od poszczególnych pojazdów nie jest maskowany.

Rys. 2.2. Schemat blokowy modelu symulacyjnego do estymacji poziomu hałasu swobodnego strumienia pojazdów

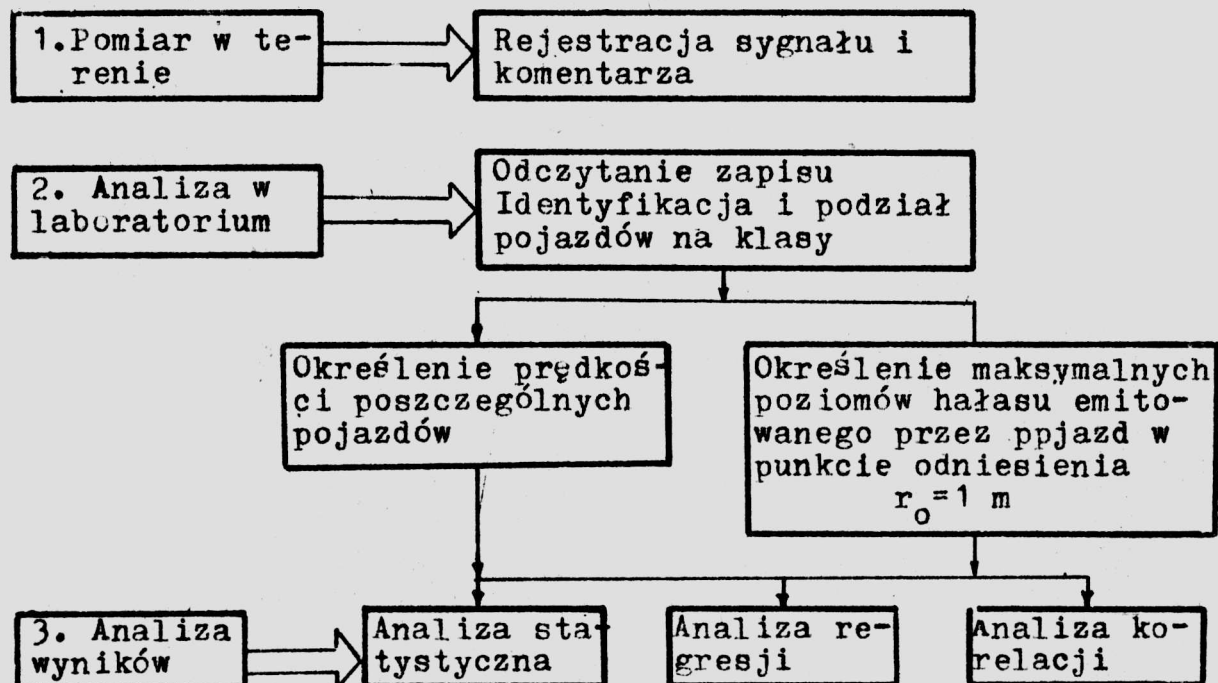


Rys. 2.2. (cd.)



2.2.3. Metodyka pomiaru i analizy

Schemat funkcjonalny metodyki pomiaru i analizy wyników przedstawiono na rys. 2.3.



Rys. 2.3. Schemat funkcjonalny metodyki pomiaru i analizy hałasu oraz prędkości pojazdów poruszających się w strumieniu ruchu

2.2.3.1. Układ pomiarowy

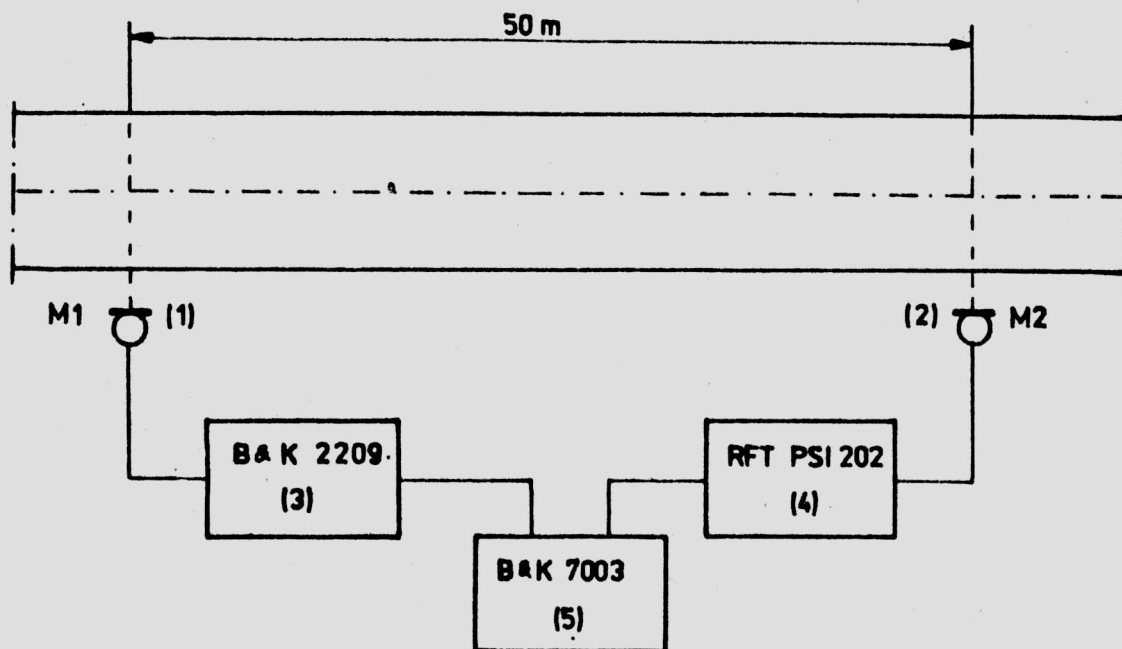
Schematy blokowe układów pomiarowych wykorzystanych do rejestracji oraz analizy hałasu w eksperymentach przedstawiono na rys. 2.4. i 2.5. W czasie pomiaru mikrofony pomiarowe umieszczone były w odległości 1 m^1 od krawędzi jezdni, na wysokości $1,2 \text{ m}^2$. Odległość między mikrofonami wynosiła 50 m .

Rejestracja sygnału

Sygnały z obu mikrofonów pomiarowych M1 i M2 (rys. 2.4.) rejestrowano na taśmie magnetycznej dwukanałowego magnetofonu firmy Bruel & Kjaer typ 7003, wraz z odpowiednim komentarzem:

¹ Można pominąć wpływ otoczenia.

² Odległość 50 m wyznaczono eksperymentalnie. Zapewnia ona przesunięcie w czasie zapisu sygnału w obu torach umożliwiające poprawne wyznaczenie prędkości.



Rys. 2.4. Schemat blokowy układu pomiarowego: 1 - mikrofon pomiarowy 1" firmy Bruel & Kjaer, typ 4145, 2 - mikrofon pomiarowy 1" firmy RFT, typ MV-01; 3 i 4 - precyzyjne mierniki poziomu dźwięku; 5 - dwukanałowy magnetofon pomiarowy

- w kanale (1) - właściwy sygnał pomiarowy z mikrofonu M1,
- w kanale (2) - pomocniczy sygnał pomiarowy oraz komentarz słowny o typie i torze ruchu pojazdu.

Analiza sygnału

Układ pomiarowy przedstawiony na rys. 2.5 obejmuje blok analizy sygnału (blok a) oraz blok pomiaru prędkości (blok b). Celem wykonanych analiz było określenie dla każdego pojazdu wielkości charakteryzujących go jako źródło hałasu:

- typ pojazdu (tzn. przynależność do k-tej klasy),
- poziom hałasu generowanego przez pojazd w punkcie odniesienia L_{01} , [dB(A)]
- prędkość ruchu V_1 [km/h].

Analiza sygnału akustycznego obejmuje:

1. Wyznaczenie profilu czasowego pojedynczego pojazdu przejeżdżającego przed mikrofonem pomiarowym M1 (na taśmie papierowej rejestratora poziomu),

2. Wyznaczenie maksymalnego poziomu hałasu L_i^1 w dB(A) generowanego przez dany pojazd w punkcie obserwacji z równoczesną identyfikacją pojazdu, obejmującą określenie marki lub typu pojazdu linii oraz kierunku ruchu.

Pomiar prędkości

Średnią prędkość danego pojazdu V_i określono na podstawie pomiaru przesunięcia czasowego $\Delta\tau_i$ między pojawieniem się pojazdu kolejno przed mikrofonem M1 i M2², zakładając stałą prędkość pojazdu w na odcinku. Zasadę pomiaru pokazano na rys. 2.6.

W eksperymencie pomiar przesunięcia czasowego $\Delta\tau_i$ wykonano metodą równoczesnego odczytu sygnału z obu kanałów. W zastosowanym układzie (rys. 2.5) rejestrator sygnałów przypadkowych 7502 B & K oraz elektroniczny przełącznik kanałów 5619 B & K stanowi dwukanałowy rejestrator cyfrowy umożliwiający czasową transformację sygnału oraz jego wielokrotne odtwarzanie. Pozwala to na równoczesną obserwację sygnałów z obu kanałów na ekranie oscyloskopu oraz cyfrowy pomiar przesunięcia czasowego między wybranymi sygnałami. Dla przyjętej metody średnia prędkość pojazdu³ V_i określona jest zależnością:

$$V_i = l / [\Delta\tau_i (f_r / f_p)] \quad (2.19)$$

gdzie: f_p , f_r - odpowiednio częstotliwość próbkowania i odtwarzania sygnału

l - odległość między mikrofonami M1 i M2.

2.2.3.2. Metody analizy danych

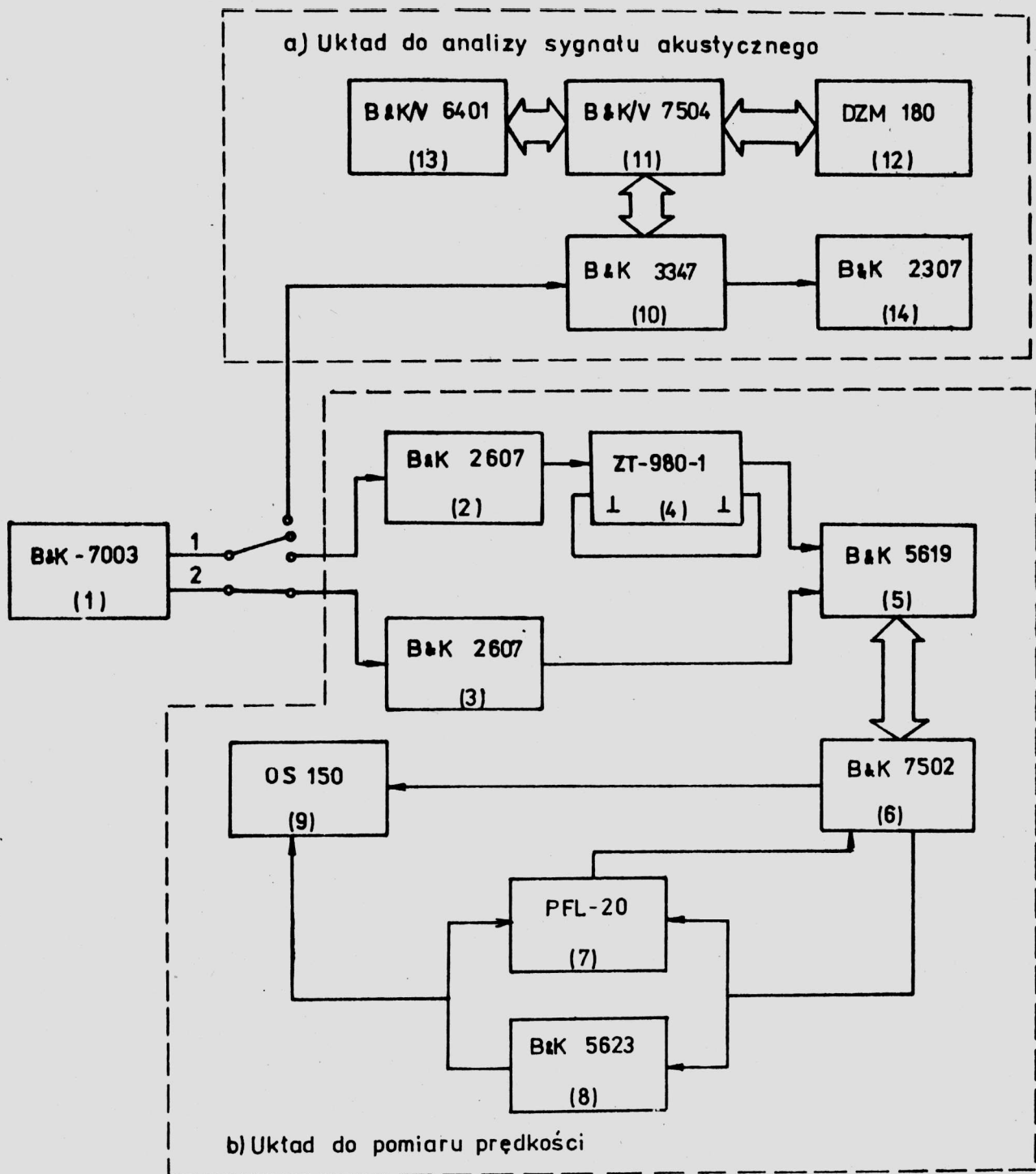
W eksperymentach I stosowano następujące metody analityczne:

1. Do weryfikacji hipotezy o istnieniu związku opisanego

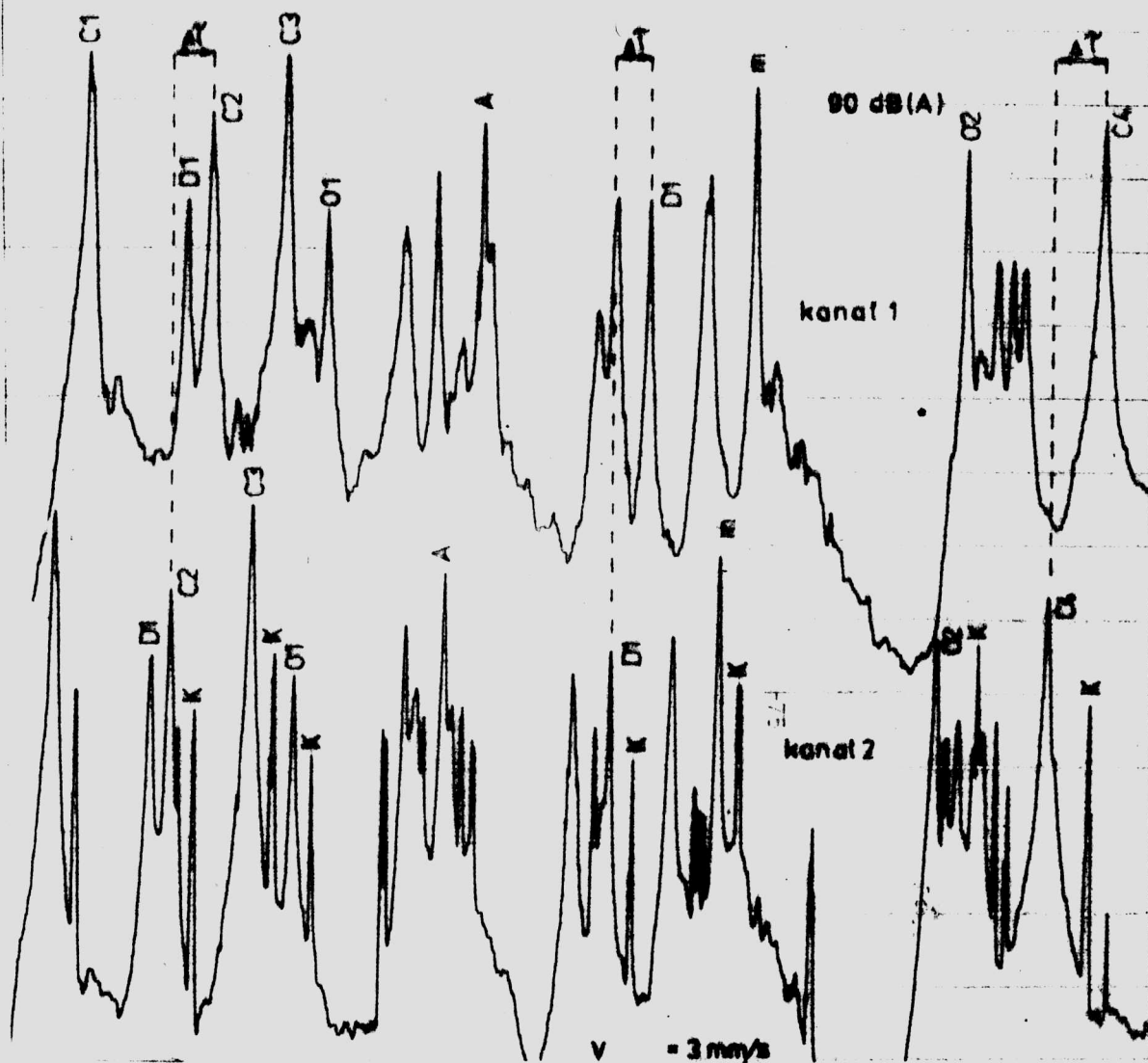
¹ Przy wyznaczaniu wartości L_i brano pod uwagę tylko te pojazdy, których poziom maksymalny był wyższy co najmniej o 10 dB(A) od poziomem tła, profil czasowy wykazywał wyraźne maksimum, a różnica pomiędzy wartościami L_i w obu punktach była mniejsza od 2 dB(A).

² Identyfikację pojazdów umożliwiał komentarz słowny.

³ Dla przyjętych wartości $f_p = 100$ Hz i $f_r = 200000$ Hz względny błąd metody pomiaru $\Delta V_i / V_i \leq 5\%$ dla prędkości $V_i \leq 100$ km/h.



Rys. 25. Schemat blokowy układu do analizy zarejestrowanych sygnałów: 1 - magnetofon pomiarowy; 2 i 3 - wzmacniacze pomiarowe; 4 - zasilacz; 5 -elektroniczny przełącznik kanałów; 6 - cyfrowy rejestrator sygnałów przypadkowych; 7 - częstotściomierz-czasomierz cyfrowy; 8 - bramka; 9 - oscyloskop wielokanałowy; 10 - analizator tercjoowo-oktawowy; 11 - minikomputer; 12 - drukarka wierszowa; 13 - dalekopis; 14 - rejestrator poziomu



Rys. 2.6. Przykładowy zapis sygnału hałasu strumienia pojazdów pokazujący zasadę pomiaru czasu przejazdu ΔT przez odcinek obserwacji $l = 50$ m. C - samochody ciężarowe; O - osobowe; D - dostawcze; m - motor; K - komentarz słowny

zależnością 2.1a (Eksp. I.1 i I.2) wyznaczono współczynnik korelacji $r_{L,v}$, wraz z statystycznym oszacowaniem jego wiarygodności [87,88].

2. Do wyznaczenia współczynników a_k i b_k w zależności (2.1a) (Eksp. I.1 i I.2) stosowano metodę regresji liniowej [87,89].

3. Do testowania hipotez o normalności rozkładów badanych zmiennych losowych (Eksp. I.3 i I.4) stosowano test zgodności χ^2 [87,90].

Ad 1.

Na poziomie ufności $\alpha = 0.05$ testowano hipotezę $H_0: r_{L,v} = 0$ wobec hipotezy alternatywnej $H_1: r_{L,v} \neq 0$. Empiryczny współczynnik korelacji $r_{L,v}$, wyznaczono z zależności 2.20.

$$r_{L,v} = \frac{\sum_{i=1}^N (L_{oi} - \langle L_{oi} \rangle_N) (V_i - \langle V \rangle_N)}{\left[\sum_{i=1}^N (L_{oi} - \langle L_{oi} \rangle_N)^2 \sum_{i=1}^N (V_i - \langle V \rangle_N)^2 \right]^{1/2}} \quad (2.20)$$

gdzie: L_{oi} - maksymalny poziom hałasu generowanego przez i-ty pojazd w punkcie odniesienia $r_0 = 1$ m,

$\langle L_{oi} \rangle_N$ - średnia wartość maksymalnych poziomów L_{oi} należących do N-elementowego zbioru $\{L_{oi}\}$

V_i - prędkość i-tego pojazdu na odcinku obserwacji

V_i - $\log(V_i)$

$\langle V \rangle_N$ - średnia wartość logarytmu prędkości należących do N-elementowego zbioru $\{V_i\}$.

Obszar krytyczny, dla którego należy odrzucić hipotezę H_0 , przyjęto w zależności od liczebności próby [88]:

$$1. |r_{L,v}| \geq u_{\alpha} \cdot (1 - r_{L,v}^2) / \sqrt{N} \quad \text{dla } N \geq 100 \quad (2.21a)$$

$$2. |r_{L,v}| \geq t_{\alpha, N-2} \cdot \sqrt{1 - r_{L,v}^2} / \sqrt{N-2} \quad \text{dla } N < 100 \quad (2.21b)$$

gdzie: u_{α} , $t_{\alpha, N-2}$ - odpowiednio wartości z rozkładu normalnego $N(0,1)$ i t-Studenta dla przyjętego poziomu ufności $\alpha = 0.05$.

Ad 2.

Estymatory punktowe a i b współczynników regresji liniowej A i B wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów według zależności (2.22) i (2.23), a ich przedziały ufności według zależności (2.24) i (2.25) [86,89].

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N (L_{oi} - \langle L_{oi} \rangle_N) (V'_i - \langle V'_i \rangle_N)}{\sum_{i=1}^N (V'_i - \langle V'_i \rangle_N)} \quad (2.22)$$

$$b = \langle L_{oi} \rangle_N - a \langle V'_i \rangle_N \quad (2.23)$$

gdzie oznaczenia jak w 2.20.

$$A \in \{a - t_{\alpha, N-2} \cdot S_a, \quad a + t_{\alpha, N-2} \cdot S_a\} \quad (2.24)$$

$$B \in \{b - t_{\alpha, N-2} \cdot S_b, \quad b + t_{\alpha, N-2} \cdot S_b\} \quad (2.25)$$

gdzie: S_a, S_b - odpowiednio estymatory odchylenia standardowego współczynników regresji a i b , przy czym:

$$S_a = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (L_{oi} - \bar{L}_{oi})^2}{[(N-2) \sum_{i=1}^N (V'_i - \langle V'_i \rangle_N)^2]^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

$$S_b = 1/N(N-2) \sum_{i=1}^N (L_{oi} - \bar{L}_{oi})^2 \quad (2.27)$$

$\bar{L}_{oi}$ - wartość funkcji $(aV' + b)$ dla $V = V_i$

Ad 3.

Hipotezę $H_0: D(X) \in \mathcal{D}_N$, gdzie $\mathcal{D}_N$ oznacza rodzinę dystrybuant rozkładu normalnego, sprawdzono testem zgodności χ^2 , na poziomie ufności $\alpha = 0.05$, przyjmując jako obszar krytyczny obszar dużych odchylen według zależności 2.28 (model I dla liczby stopni swobody $c \leq 30$) oraz według zależności 2.29 (model II dla $c > 30$).

$$\text{model I:} \quad |\chi^2| \geq \chi^2_{\alpha} \quad (2.28)$$

$$\text{gdzie: } \chi^2 = \sum_{i=1}^r (n_i - Np_i)/Np_i \quad (2.29)$$

χ^2_{α} - wartość z rozkładu χ^2 dla $(c = r-1)$ stopni swobody i założonego poziomu ufności α .

n_i - empiryczna liczba obserwacji w klasie i ,

Np_i - teoretyczna liczba obserwacji w klasie i .

$$\text{model II:} \quad u_o \geq u_{\alpha} \quad (2.30)$$

gdzie:

$$u_o = \sqrt{2 \chi^2} - \sqrt{2c - 1} \quad (2.31)$$

u = wartość z rozkładu normalnego $N(0,1)$ dla założonego poziomu ufności α .

Przy stosowaniu testu założono, że minimalna teoretyczna liczba obserwacji $Np_i > 5$ [90].

2.2.4. Wyniki eksperymentów I

2.2.4.1. Wyniki Eksperymentu I.1

W Eksp. I.1 wykonano pomiary hałasu pojedynczych pojazdów osobowych poruszających się z prędkościami z zakresu 30-100 km/h z przyrostem co 10 km/h. Dla każdego przełożenia skrzyni przekładniowej wykorzystywano pełny możliwy do uzyskania przy danym typie samochodu zakres prędkości. Wyniki pomiarów w postaci graficznej przedstawiono na rys. 2.7, gdzie również naniesiono odcinki prostych o nachyleniu wyznaczonym z analizy regresji. Wartości współczynników prostej regresji wyznaczonych z zależności (2.22 - 2.27) oraz wartość współczynnika korelacji $r_{L,v}$, (2.20) podano w tabeli 2.1.

Otrzymane wyniki wskazują, że istnieje silny związek pomiędzy poziomem hałasu generowanego przez pojazd a jego prędkością, przy czym związek ten pogarsza się w nieznacznym stopniu, gdy analizujemy go bez uwzględnienia przełożenia skrzyni przekładniowej. Ma to istotne znaczenie dla przebiegu dalszych badań eksperymentalnych, gdyż uzasadnia celowość badania tej zależności dla swobod-

¹ W praktycznych pomiarach strumienia pojazdów, bez możliwości współpracy kierowców z eksperymentatorem, określenie, przy jakim przełożeniu poruszają się pojazdy, jest niemożliwe.

2.2.4.2. Wyniki Eksperymentu I.2

W Eksp. I.2 dla sześciu odcinków obserwacji podanych w rozdziale 2.2.2. wyznaczono z zależności 2.22 - 2.27 współczynniki a_k i b_k reguły RG1d (2.1a) oraz szerokości przedziałów ufności $2\Delta a_k$ i $2\Delta b_k$.

Konieczne było tu przyjęcie liczby klas pojazdów k oraz ustalenie kryterium klasyfikacji pojazdu do danej klasy. Opierając się na danych zamieszczonych w pracach [66,67,69,71,74] zdecydowano rozważyć dwa warianty podziału:

K1 - podział parku pojazdów na trzy klasy (lekka, średnia i ciężka). W tym wariancie do klasy lekkiej zaliczono pojazdy osobowe, do klasy średniej pojazdy dostawcze, natomiast do klasy ciężkiej pozostałe pojazdy, w tym ciężarówki z przyczepami oraz pojazdy jednośladowe¹.

K2 - podział parku pojazdów na dwie klasy (lekka, ciężka). W wariancie dwuklasowym do klasy lekkiej zaliczono samochody osobowe i dostawcze.

W tabeli 2.2. - 2.4 podano wyznaczone w eksperymencie wartości współczynników a_k i b_k oraz współczynnika korelacji $r_{L,V}$ dla poszczególnych badanych odcinków obserwacji, a także sumaryczne wyniki dla wszystkich odcinków (tzn. otrzymane w wyniku łącznej analizy materiału sześciu odcinków).

Każda z tabel 2.2.-2.4 odpowiada odrębnej klasie pojazdów przy podziale trójklasowym, natomiast przy podziale dwuklasowym sumaryczne wyniki dla klasy lekkiej podano w tabeli 2.4. (wiersz 7). Wyniki sumaryczne przyjęto jako reprezentację pewnej uśrednionej sytuacji w ruchu na odcinku drogi spełniającej założone w pracy postulaty (swobodny przepływ ruchu) oraz odpowiadającej krajowym warunkom ruchu i krajowemu taborowi pojazdów.

¹ W odniesieniu do ciężarówek z przyczepą badania eksperymentalne, których wyników w niniejszej pracy nie zamieszczono, wykazały, że nie istnieje współzależność między poziomem hałasu a prędkością ruchu, co najprawdopodobniej wynika ze zbyt dużego odstępstwa od założenia o punktowości pojazdu jako źródła hałasu. W przypadku pojazdów jednośladowych ich nieliczny udział w strumieniu ruchu nie pozwolił na stwierdzenie, czy istnieje omawiana zależność. Stwierdzono jednak, że pod względem średniego poziomu hałasu mierzonego w dB(A) oraz średniej prędkości ruchu pojazdy te jako źródła hałasu zbliżone są do pojazdów klasy ciężkiej. Warto zaznaczyć, że gdyby nawet te pojazdy miały zdecydowanie odmienny związek $L = f(V)$, to ich wkład do grupy pojazdów ciężkich jest na tyle mały, że wynikający stąd błąd będzie niewielki.

Tabela 2.2. Wyniki analizy regresji i korelacji dla weryfikowanej zależności $L_o = a_k \log V + b_k$. Klasa "lekka" (podział K1)

Lp.	punkt obserwacji	liczba pojazdów N	a_k	Δa_k^1	b_k	Δb_k^2	$r_{L_o, V}$
			[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	
1	Ap-1	77	7.6	9.0	77.2	0.6	0.18 ^x
2	Ap-2	34	18.0	11.0	57.0	0.9	0.48
3	Aw-1	131	17.2	6.3	60.0	0.5	0.42
4	Aw-2	267	20.2	5.8	55.6	0.4	0.4
5	Sz-1	154	26.1	5.6	45.0	0.5	0.6
6	Sz-2	65	22.8	7.0	48.6	0.6	0.6
7	razem	728	20.6	2.5	54.6	0.3	0.5

1, 2 - jak w tabeli 2.1.

^x - brak podstaw do odrzucenia hipotezy $H_o: r_{L_o, V} = 0$

Tabela 2.3. Wyniki analizy regresji i korelacji dla weryfikowanej zależności $L_o = a_k \log V + b_k$. Klasa "średnia" (podział K1 - wiersz 1-6). Klasa "lekka" (podział K2 - wiersz 7)

Lp.	punkt obserwacji	liczba pojazdów N	a_k	Δa_k^1	b_k	Δb_k^2	$r_{L_o, V}$
			[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	
1	Ap-1	26	15.7	13.6	64.4	1.1	0.42
2	Aw-1	41	13.7	14.0	67.6	1.1	0.33
3	Aw-2	112	18.0	5.9	58.9	0.5	0.5
4	Sz-1	31	15.4	12.5	65.2	0.7	0.41
5	Sz-2	37	18.0	16.0	58.8	1.0	0.48
6	razem	247	13.6	4.2	68.0	0.4	0.4
7	razem	975	18.0	2.1	60.0	0.2	0.46

1, 2 - jak w tabeli 2.1.

Tabela 2.4. Wyniki analizy regresji i korelacji dla weryfikowanej zależności $L_0 = a_k \log V + b_k$. Klasa "ciężka"

Lp.	Punkt obserwacji	Liczba pojazdów N	a_k	Δa_k^1	b_k	Δb_k^2	$r_{L_0, V}$
			[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	
1	Ap-1	80	13.7	10.1	73.8	0.8	0.29
2	Ap-2	50	10.7	13.4	78.9	1.1	0.22 ^x
3	Aw-2	81	8.3	7.0	83.8	0.8	0.26
4	Sz-1	52	13.7	10.6	76.3	0.8	0.34
5	Sz-2	49	3.5	11.2	89.0	0.4	0.085 ^x
6	łącznie	312	11.2	3.94	78,9	0.5	0.29

x - brak podstaw do odrzucenia hipotezy $H_0 : r_{L_0, V} = 0$
 1,2 - jak w tabeli 2.1.

2.2.4.3. Wyniki Eksperymentu I.3

W Eksp. I.3 dla sumarycznego zestawienia materiału badawczego z sześciu odcinków obserwacji testowano hipotezę H_0 o normalności rozkładu $p_{k,r}(L_0)$ poziomów hałasu generowanego przez pojazdy należące do danej klasy k, poruszające się z prędkościami V_i należącymi do r-tego przedziału prędkości (patrz reguła RG1p (2.1b)).

Przyjęto trzy klasy pojazdów, zgodnie z podziałem K1 dokonanym w rozdziale (2.2.4.2), a zakres występujących prędkości podzielono na przedziały o szerokości 5 km/h. Hipotezę H_0 weryfikowano testem χ^2 (2.28) na poziomie ufności $\alpha = 0,05$, dla każdej klasy k i każdego przedziału ΔV , dla których liczebność próby $N \geq 30$.

Przykładowe, empiryczne rozkłady $p_{k,r}(L_0)$ wyznaczone dla pojazdów klasy lekkiej (podział K1) pokazano na rys. 2.8. Na 19 zbadanych rozkładów tylko w trzech przypadkach istniała podstawa do odrzucenia hipotezy H_0 .

W świetle uzyskanych wyników przyjęto w dalszej części pracy hipotezę o normalności rozkładu $p_{k,r}(L_0)$ jako obowiązującą i wyznaczono następujące parametry tego rozkładu dla poszczególnych klas pojazdów i przedziałów prędkości:

- poziom średni $\langle L_0 \rangle$
- odchylenie standardowe σ_{L_0}

- parametry pozycyjne rozkładu $(L_o)_{10}$, $(L_o)_{50}$, $(L_o)_{90}$

Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci graficznej na rysunkach 2.9 - 2.11. W zbiorze wartości średnich oraz w zbiorze wartości quasimaksymalnych i quasiminimalnych uszeregowanych kolejno względem wzrastających prędkości ruchu występuje wyraźny trend wzrostowy.

Celem porównania wyników tego eksperymentu z wynikami Eksp. I.2 określono na rys. 2.9 - 2.11 proste regresji o współczynnikach (tab. 2.2 - 2.4):

$$1) (a_k, b_k) \quad (\text{prosta } \bar{L}_o) \quad (2.32a)$$

$$2) (a_k + \Delta a_k, b_k) \quad (\text{prosta } \bar{L}'_o) \quad (2.32b)$$

$$3) (a_k - \Delta a_k, b_k) \quad (\text{prosta } \bar{L}''_o) \quad (2.32c)$$

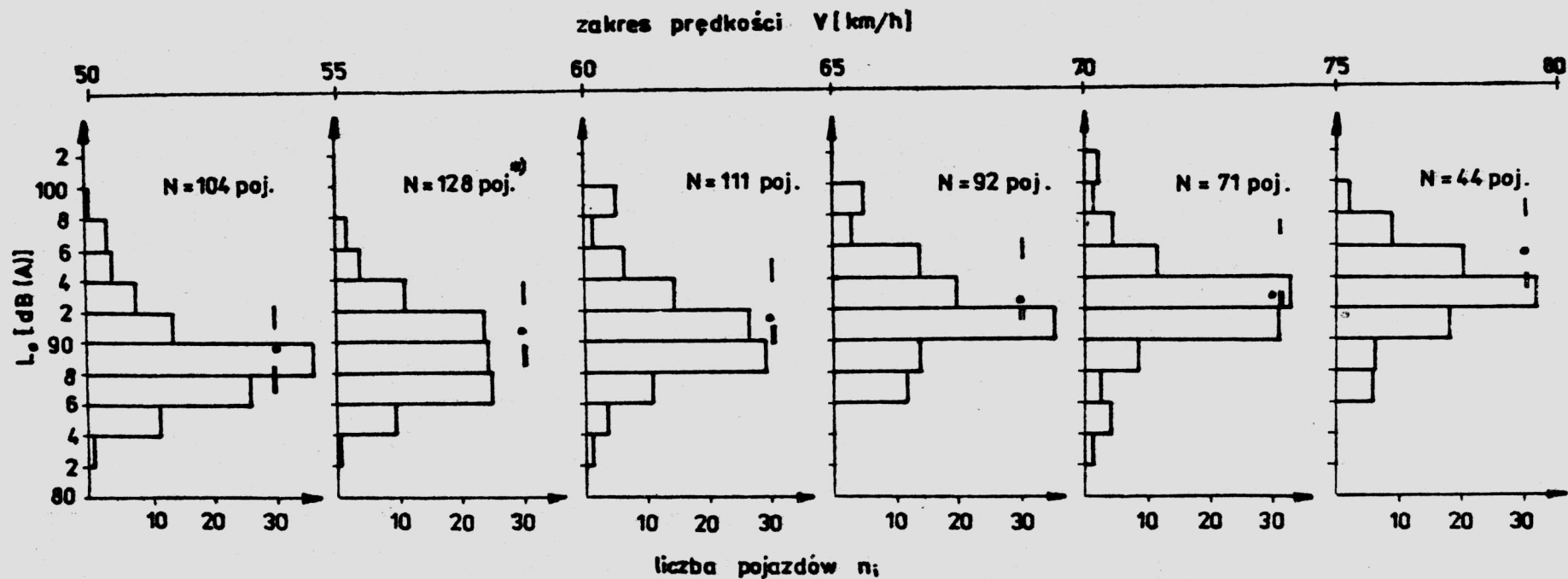
Współczynniki $(a_k + \Delta a_k)$ i $(a_k - \Delta a_k)$ odpowiadają krańcowym wartościom wyznaczonego przedziału ufności współczynnika a_k dla $\alpha = 0.05$.

Daje się zauważyć występującą zależność między wzrostowym trendem wartości średnich $\langle L_{ok,r} \rangle$ rozkładów $p_{k,r}(L_o)$ a przebiegiem prostej regresji o współczynnikach (a_k, b_k) oraz wzrostowym trendem wartości quasimaksymalnych $(L_o)_{10}$ oraz quasiminimalnych $(L_o)_{90}$ a przebiegiem prostych regresji odpowiednio o współczynnikach $(a_k + \Delta a_k; b_k)$ i $(a_k - \Delta a_k; b_k)$.

2.2.4.4. Wyniki Eksperymentu I.4

W Eksp. I.4 materiał badawczy oraz warunki eksperymentu były identyczne jak w Eksp. I.2. Dla każdego odcinka obserwacji testowano hipotezę H_0 o normalności rozkładu $p_k(V)$ prędkości V_i pojazdów poruszających się po danym odcinku drogi, należących do klasy k . Przyjęto trzy klasy pojazdów - jak w rozdziale 2.2.4.2.

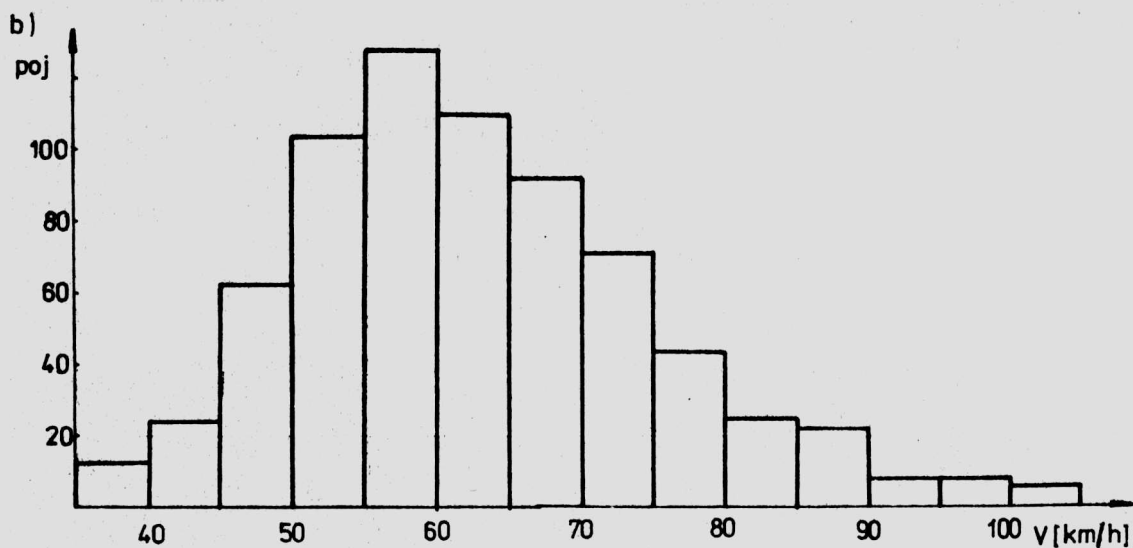
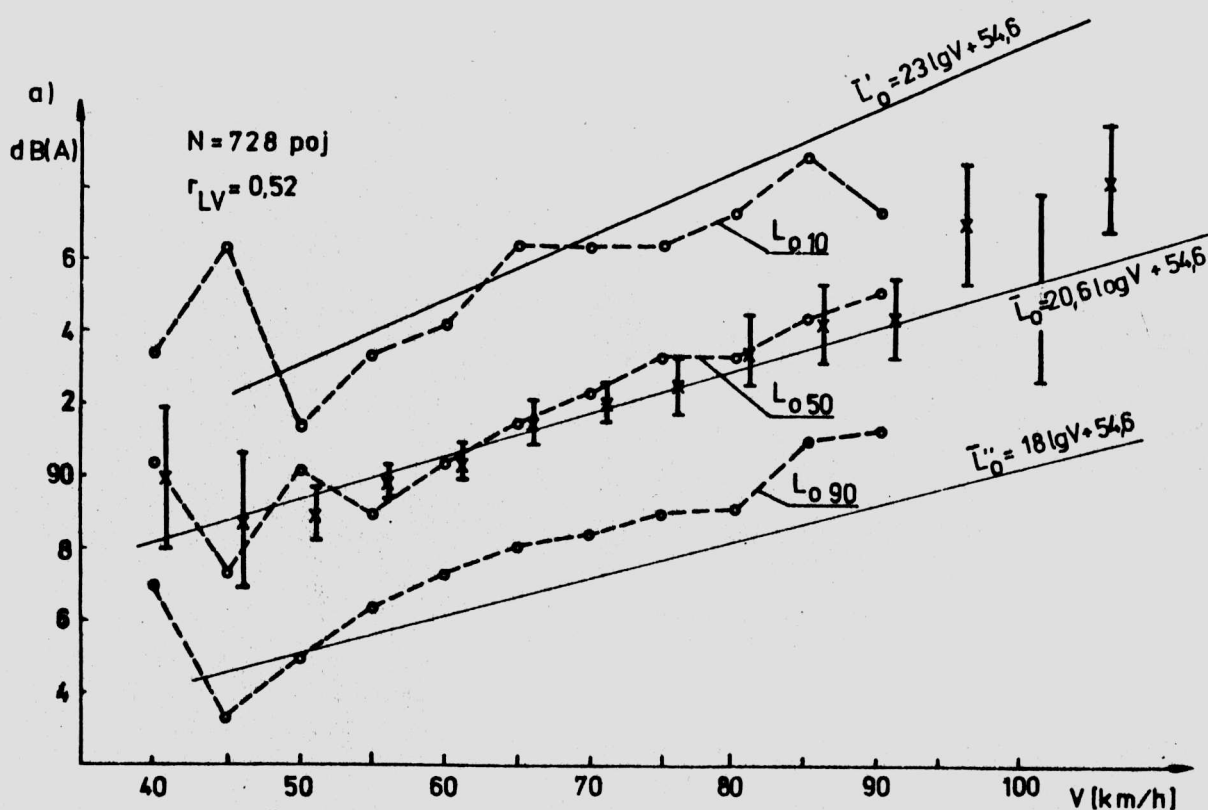
Hipotezę H_0 sprawdzono testem χ^2 na poziomie $\alpha = 0.05$ (rozdział (2.2.2.2), zależność (2.28)). Stwierdzono, że na szesnaście testowanych rozkładów $p_k(V)$ tylko dla dwóch, wyznaczonych dla klasy ciężkich, istnieje podstawa do odrzucenia hipotezy H_0 . Przyjęto zatem hipotezę o normalności rozkładu $p_k(V)$ jako obowiązującą w dalszej części pracy. Wyznaczone parametry rozkładów $p_k(V)$ dla różnych warunków ruchu podano w tabeli 2.5.



Rys. 2.8. Przykładowe empiryczne rozkłady $p_{k,r}(L_0)$ poziomów hałasu generowanego przez pojazdy należące do klasy lekkiej ($k=1$) (podział K1), wyznaczone dla przedziałów prędkości $\Delta V=5$ km/h.

• - wartości średnie poziomu hałasu $\langle L_0 \rangle$ w danym przedziale prędkości ΔV ; "—" — "—" zakresy zmian poziomu hałasu wynikające ze zmiany prędkości o ΔV , wyznaczone dla pojedynczego pojazdu jadącego odpowiednio na III i IV biegu dla danych z tab. 2.1.

x - istnieje podstawa do odrzucenia hipotezy $H_0: p_{k,r}(L_0) \in \mathcal{N}$

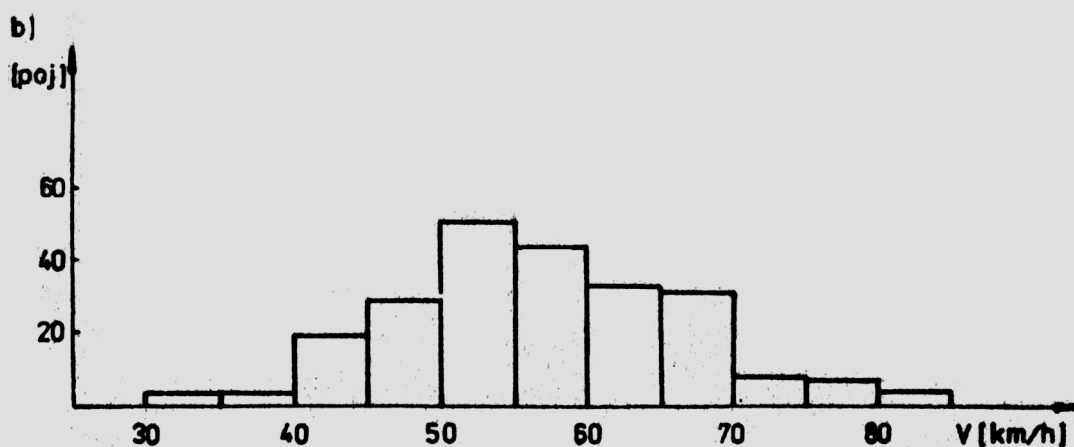
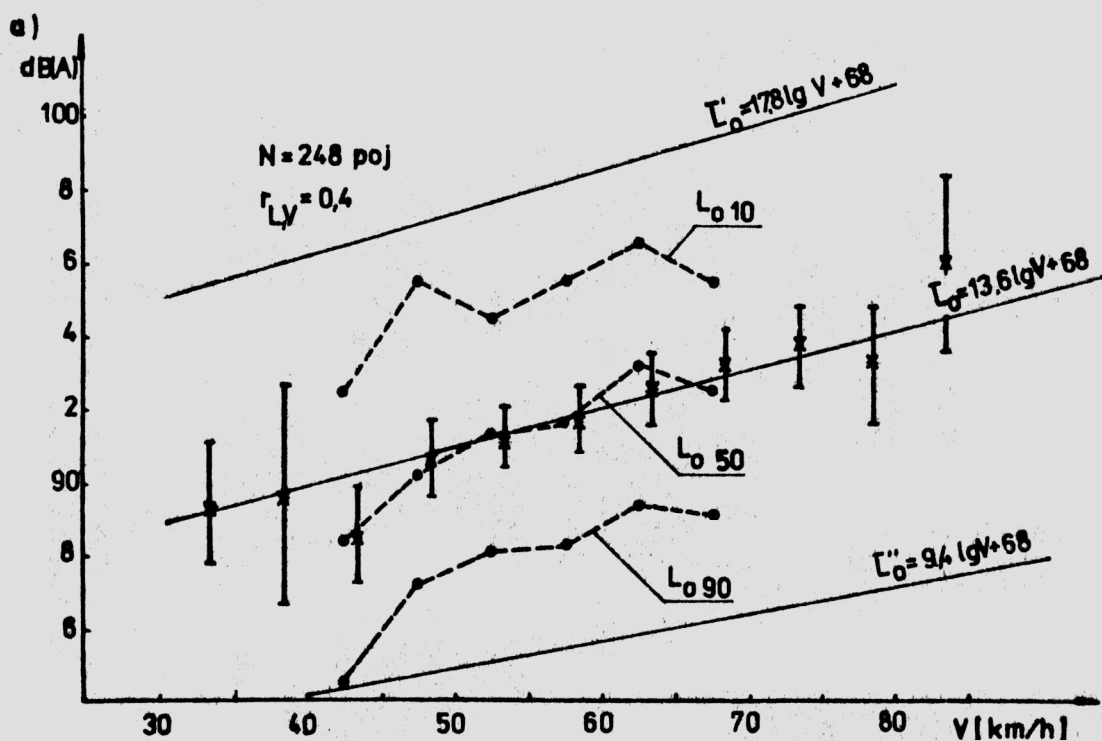


Rys. 2.9. a) - Parametry pozycyjne $(L_0)_{10}$, $(L_0)_{50}$, $(L_0)_{90}$ oraz poziomy średnie $\langle L_0 \rangle$ rozkładów $p_{k,r}(L_0)$, wyznaczone dla klasy lekkiej ($k=1$) w przedziałach prędkości o szerokości $\Delta V = 5 \text{ km/h}$.

—x— - szerokość przedziału ufności poziomy średniego $\langle L_0 \rangle$ dla $\alpha = 0.05$

$\bar{L}_0, \bar{L}'_0, \bar{L}''_0$ - proste regresji o współczynnikach podanych w (2.32a - 2.32c)

b) - Rozkład liczby pojazdów poruszających się z prędkościami należącymi do danego przedziału prędkości ΔV_r .

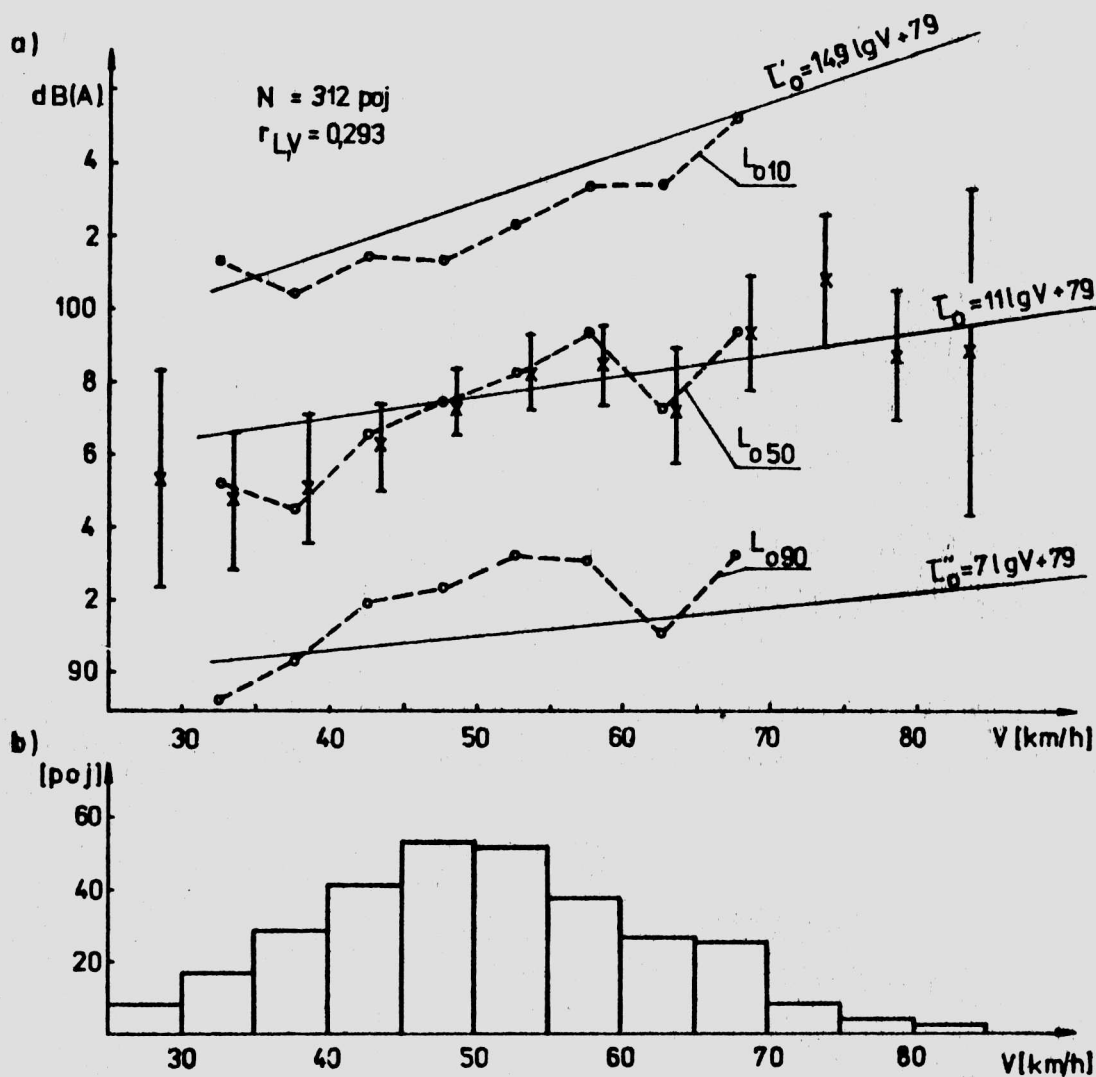


Rys. 2.10. a) - Parametry pozycyjne rozkładów $(L_o)_{10}$, $(L_o)_{50}$, $(L_o)_{90}$ oraz poziomy średnie $\langle(L_o)\rangle$ rozkładów $p_{k,r}(L_o)$ wyznaczone dla klasy średniej ($k=2$) w przedziałach prędkości o szerokości $\Delta V = 5 \text{ km/h}$.

—*— szerokość przedziału ufności poziomu średniego $\langle L_o \rangle$ ($\alpha = 0.05$)

L_o, L'_o, L''_o - proste regresji o współczynnikach podanych w (2.32a - 2.32c)

b) Rozkład liczby pojazdów poruszających się z prędkościami należącymi do danego przedziału prędkości ΔV_r .



Rys. 2.11. a) - Parametry pozycyjne $(L_0)_{10}$, $(L_0)_{50}$, $(L_0)_{90}$ oraz poziomy średnie $\langle L_0 \rangle$ rozkładów $p_{k,r}(L_0)$ wyznaczone dla klasy ciężkiej ($k=3$) w przedziałach prędkości o szerokości $\Delta V = 5$ km/h.

—x— - szerokość przedziału ufności poziomu średniego $\langle L_0 \rangle$ ($\alpha = 0.05$)

$\bar{L}_0, \bar{L}'_0, \bar{L}''_0$ - proste regresji o współczynnikach podanych w (2.32a - 2.32c).

b) - Rozkład liczby pojazdów poruszających się z prędkościami należącymi do danego przedziału prędkości ΔV_r .

Tabela 2.5. Wyniki pomiaru parametrów rozkładu prędkości ruchu na wybranych odcinkach drogi, dla trzech klas pojazdów. $\langle V \rangle$ - średnia prędkość; σ_V - odchylenie standardowe; V_d - najmniejsza zmierzona prędkość; V_g - największa zamierzona prędkość

punkt pom.	klasa lekka (k=1)				klasa średnia (k=2)				klasa ciężka (k=3)			
	N	$\langle V \rangle$	σ_V	$V_d - V_g$	N	$\langle V \rangle$	σ_V	$V_d - V_g$	N	$\langle V \rangle$	σ_V	$V_d - V_g$
	[poj.]	[km/h]			[poj.]	[km/h]			[poj.]	[km/h]		
Ap-1	77	55	7.5	35-75	26	50	8.6	25-70	80	44	8.3 ^x	25-60
Ap-2	34	53	9	30-80	-	-	-	-	-	-	-	-
Aw-1	131	60	10.6	30-90	41	53	9.2	30-75	50	65	9.5 ^x	25-70
Aw-2	267	59	10	35-90	112	55	9.3	25-80	81	51	12	20-80
Sz-1	154	75	13.5	40-110	31	66	8.6	50-85	52	61	10	30-90
Sz-2	65	76	14	45-110	38	65	10.5	45-85	49	60	10.5	35-85

x - istnieje podstawa do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu prędkości $p_k(V)$

2.2.5. Wnioski

Wyniki Eksp. I.1 - I.4 potwierdziły słuszność przyjętych w rozdziałach 2.1.2 i 2.1.3. założeń do modelu dotyczących:

- podziału parku pojazdów na skończoną liczbę klas ze względu na charakterystyki akustyczne pojazdów oraz ich prędkości ruchu (założenie Z10),

- istnienia zależności pomiędzy poziomem hałasu generowanym przez pojazdy poruszające się w swobodnym strumieniu ruchu a ich klasą i prędkością ruchu (założenie Z12),

- normalności rozkładu $p_k(V)$ prędkości ruchu pojazdów należących do klasy k (założenie Z8) oraz rozkładu $p_{k,r}(L_0)$ poziomów hałasu generowanego przez pojazdy klasy k poruszające się ze zbliżonymi prędkościami (reguła RG1p (2.1b)).

Wyniki z Eksp. I.1 - I.4 nie pozwoliły na jednoznaczne określenie, który z wariantów reguły RG1 należy przyjąć jako obowiązującą regułę i na ile klas należy dzielić park pojazdów. Celowe jest jednak sformułowanie wniosków, które mogą być przydatne przy ostatecznym ustaleniu struktury modelu symulacyjnego:

W1 - Istnieją silne związki między wynikami eksperymentalnymi uzyskanymi dla deterministycznego i probabilistycznego wariantu reguły RG1 (Eksp. I.2 i I.3). Nie muszą to być zatem warianty alternatywne, lecz mogą się uzupełniać.

W2 - Porównawcza analiza wyników Eksp. I.2 i I.3 (rys. 2.9 - 2.11) wskazuje, że model symulacyjny oparty na deterministycznym wariantcie reguły RG1 będzie szacował w sposób zadowalający wartość średnią poziomu hałasu w punkcie obserwacji $\langle L \rangle$, natomiast parametry pozycyjne L_{10} i L_{90} rozkładu $p(L)$ będą szacowane odpowiednio z niedomiarem lub nadmiarem.

W3 - Z Eksp. I.2 wynika, że istnieje różnica w trendach wzrostu wartości średnich poziomu hałasu $\langle L_0 \rangle$ wraz ze wzrostem prędkości dla klasy pojazdów lekkich i średnich (rys. 2.9 i 2.10), lecz analiza różnic tych wartości z uwzględnieniem odchylenia standardowego σ_{L_0} rozkładu $p_{k,r}(L_0)$ w przedziałach prędkości nie wykazuje, aby były one istotne. (tabela 2.7)

W4 - Z wyników Eksp. I.4 można wnioskować o celowości utrzymania podziału parku pojazdów na trzy klasy, gdyż istnieją różnice między wartościami średnimi prędkości ruchu dla tych trzech klas, a także różnice w trendzie tych wartości przy wzroście prędkości ruchu (im większe prędkości, tym większe różnice pomiędzy wartościami średnimi (patrz tabela 2.5.)).

W świetle powyższych stwierdzeń oraz wniosków uznano, że na tym etapie pracy nie jest możliwe podjęcie ostatecznej decyzji co do struktury modelu symulacyjnego. Zdecydowano zatem przeprowadzić weryfikację modelu z uwzględnieniem wariantów reguły RG1 i wyniki weryfikacji przyjąć za ostateczne kryterium wyboru reguł modelu.

2.2.6. Reguła generalna RG1 i jej parametry

Ustalenie typu reguły RG1 oraz jej parametrów jest przy przyjętym modelu symulacyjnym równoznaczne z ustaleniem modelu i jego parametrów wewnętrznych. Parametry występujące w pozostałych regułach modelu są wprowadzane do modelu jako dane wejściowe, a sama forma reguł nie jest alternatywna.

W przypadku reguły RG1 przyjęto do dalszych badań trzy warianty. Warianty RG1d i RG1p sformułowano uprzednio w rozdziale 2.1.3, natomiast trzeci wariant - reguła RG1p/d - wynika z analizy i wniosków zawartych w poprzednim rozdziale. W tym wariantcie wartość średnia rozkładu $p_{k,V}(L_0)$ ¹ wyliczana jest z reguły RG1d, natomiast sama generacja poziomu hałasu i-tego pojazdu zachodzi w myśl reguły RG1p (Zapewnia to możliwość generowania poziomu hałasu dla osi prędkości typu continuum, a nie dla przedziałów prędkości). Na podstawie wyników Eksp. I przyjęto regułę RG1 w postaci:

$$RG1d: \bigwedge_{i \in S} \bigwedge_{k \in \{1,3\}} \begin{cases} \bigwedge_{v_i \geq 35} \{L_{oi,k} = a_k \log v_i + b_k\} & (2.33a) \\ \bigwedge_{v_i < 35} \{L_{oi,k} = a_k \log(35) + b_k\} & (2.33b) \end{cases}$$

gdzie: a_k i b_k - empiryczne współczynniki regresji liniowej wyznaczone w Eksp. I.2 dla klasy pojazdów lekkich, średnich i ciężkich. Wartości tych parametrów podano w tabeli 2.6.

Tabela 2.6. Parametry reguły RG1d (2.33)

klasa	lekka k=1	średnia k=2	ciężka k=3
a_k	21	13.6	11
b_k	54	68	79

¹ $p_{k,V}(L_0)$ - rozkład poziomów hałasu generowanego w punkcie odniesienia $r_0=1m$ przez pojazdy k-tej klasy poruszające się z prędkością V .

$$RG1p: \bigwedge_{i \in S} \bigwedge_{k \in K} \begin{cases} \bigwedge_{r \in \{1, 11\}} \{L_{oi,k,r}: N(\langle L_{ok,r} \rangle, \sigma_{L_{ok,r}})\} & (2.34a) \\ \bigwedge_{r < 1} \{L_{oi,k,1}: N(\langle L_{ok,1} \rangle, \sigma_{L_{ok,1}})\} & (2.34b) \\ \bigwedge_{r > 11} \{L_{oi,k,11}: N(\langle L_{ok,11} \rangle, \sigma_{L_{ok,11}})\} & (2.34c) \end{cases}$$

gdzie: r - indeks przedziału prędkości, do którego należy prędkość V_i :

$$V_o + r \Delta V < V_i \leq V_o + (r+1) \Delta V \quad (V_o = 30 \text{ km/h}, \Delta V = 5 \text{ km/h})$$

$\langle L_{ok,r} \rangle \sigma_{L_{ok,r}}$ - parametry rozkładu $p_{k,r}(L_o)$ wyznaczone w Eksp. I.3. Wartości tych parametrów podano w tabeli 2.7.

Tabela 2.7. Parametry reguły RG1p wyznaczone w Eksp. I.3

indeks przedziału	zakres prędkości	klasa lekka $k=1$		klasa średnia $k=2$		klasa ciężka $k=3$	
r		$\langle L_o \rangle$	σ_{L_o}	$\langle L_o \rangle$	σ_{L_o}	$\langle L_o \rangle$	σ_{L_o}
	[km/h]	[dB(A)]		[dB(A)]		[dB(A)]	
1	35-40	89	4.8	89	3.5	95	3.9
2	-45	89	4.8	88.5	3.1	96.2	4.0
3	-50	89	2.9	90.6	2.7	97.5	3.5
4	-55	90	2.9	91	2.8	98.3	3.6
5	-60	90.5	2.8	91.7	2.9	98.5	3.6
6	-65	91.6	3.4	92.5	2.8	97.5	4.3
7	-70	92.2	3.2	93.2	2.7	99.5	3.9
8	-75	92.6	3.1	93.5	2.8	100	4.0
9	-80	93.6	3.3	94.2	2.8	99	4.0
10	-85	94.5	2.8	94.2	2.8 ^x	99 ^x	4.0
11	-90	94.8	2.5	94.2	2.8 ^x	99 ^x	4.0

^x - wartości parametrów $\langle L_o \rangle$ i σ_{L_o} przyjęto jak dla przedziału $r = 9$.

$$RG1p/d: \bigwedge_{i \in S} \bigwedge_{k \in K} \left\{ L_{oi,k} : [N(L_{ok}, \sigma_k) \wedge (L_{ok} \leftarrow RG1d)] \right\} \quad (2.35)$$

gdzie: σ_k - odchylenie standardowe rozkładów $p_{k,V}(L_o)$ poziomów hałasu pojazdów k -tej klasy jadących z prędkością V , przy czym $\sigma_k = \text{const}$. Wartości σ_k dobrano na podstawie wyników otrzymanych w Eksp. I.3. Wynoszą one: $\sigma_1=3,1$ (klasa lekka), $\sigma_2=2,8$ (klasa średnia), $\sigma_3=3,8$ (klasa ciężka)

3. Weryfikacja modelu

3.1. Wprowadzenie

Weryfikację modelu oparto na porównaniu wartości parametrów hałasu generowanych przez model z wartościami wyznaczonymi eksperymentalnie, przy czym wprowadzane do modelu parametry opisujące ruch na odcinku drogi określono poprzez pomiar odpowiednich parametrów dla wziętych do porównania rzeczywistych sytuacji w ruchu.

Podstawowym założeniem przy formułowaniu kryterium weryfikacji był losowy charakter hałasu komunikacyjnego i wynikający z tego fakt, że dla określonych sytuacji w ruchu i dla danego czasu trwania pomiaru wartości parametrów wyznaczone w procesie symulacji, jak i w pomiarze eksperymentalnym są estymatorami rzeczywistych wartości parametrów.

Wynika stąd, że przed ustaleniem kryterium weryfikacji konieczne jest wyznaczenie - dla przyjętej metody analizy - dokładności eksperymentalnego oszacowania przyjętych parametrów hałasu oraz błędu oszacowania wartości parametrów uzyskanych w procesie symulacji.

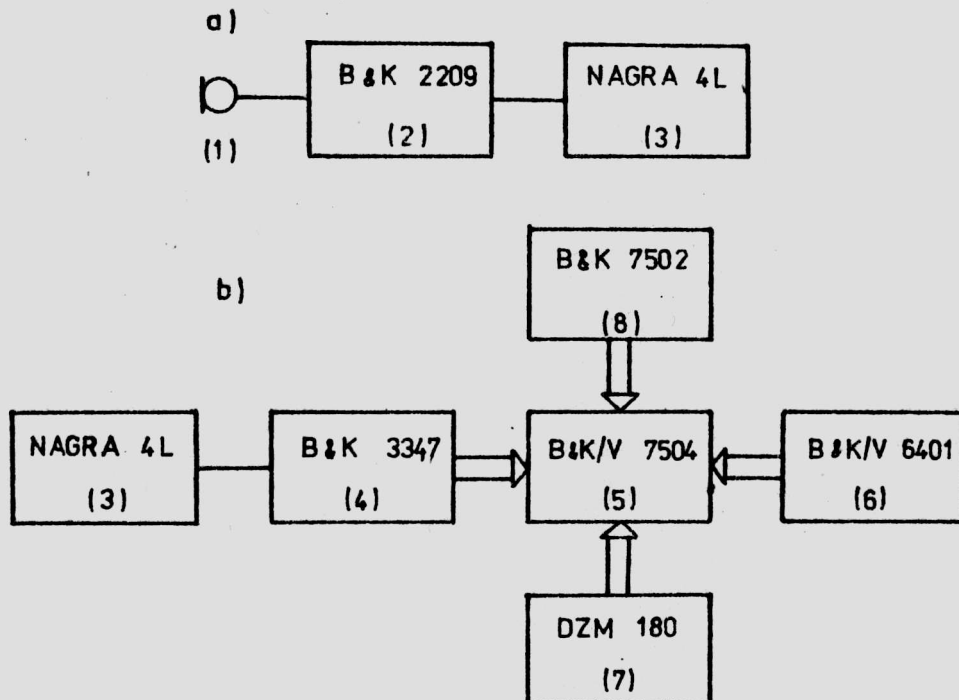
3.2. Oszacowanie błędów estymacji parametrów hałasu

3.2.1. Oszacowanie błędu pomiaru eksperymentalnego

3.2.1.1. Wprowadzenie

W pracy przyjęto pośrednią metodę pomiaru hałasu ruchu drogowego. Sygnał rejestrowano magnetofonem pomiarowym Nagra 4L,

a następnie w warunkach laboratoryjnych poddawano analizie¹ w układzie z rys. 3.1.



Rys. 3.1. Schemat blokowy układu do pomiaru (a) i analizy (b) sygnału hałasu ruchu drogowego. 1 - mikrofon pomiarowy 1" firmy B&K typ 4145; 2 - precyzyjny miernik poziomu hałasu; 3 - magnetofon pomiarowy; 4 - analizator oktaowy; 5 - minikomputer; 6 - dalekopis; 7 - drukarka wierszowa; 8 - rejestrator sygnałów przypadkowych

Sygnał analogowy próbkowano w odstępach Δt otrzymując z ciągu dyskretnych wartości chwilowych poziomu N -elementowy zbiór $\{L_j\}$, na którego podstawie wyznaczono estymatory parametrów hałasu. Zbiór mierzonych parametrów był identyczny jak podano w rozdziale 2.1.3 parametry wyjściowe modelu (reguły terminalne RT2 - RT7).

¹ Do analizy oraz do wyznaczania parametrów rozkładu hałasu wykorzystano wykonany w ramach pracy program ASH IV, napisany w języku BASIC na minikomputer 7504 firmy Varian/Bruel & Kjaer.

Przy przyjętej metodzie pomiaru i analizy oraz przy uwzględnieniu charakteru badanego zjawiska można wydzielić¹ trzy zasadnicze czynniki wpływające na błąd oszacowania:

- czas pomiaru T_s ,
- odstęp próbkowania Δt ,
- parametry ruchu i związane z nimi odchylenie standardowe σ_L rozkładu poziomu hałasu $p(L)$.

Na podstawie statystycznej teorii próbkowania można stosunkowo prosto wyznaczyć błędy estymacji parametrów rozkładu poziomu hałasu, tzn. $\langle L \rangle$ i $L_p(p \in \{10, 50, 90\})$, przy założeniu, że sygnał w badanym okresie czasu jest ergodycznym losowym procesem stacjonarnym, rozkład poziomu hałasu $p(L)$ w populacji generalnej jest rozkładem normalnym, a sygnał jest próbkowany w odstępach czasu $\Delta t > \tau_c$ (gdzie τ_c - czas koherencji sygnału), czyli zakładając próbkowanie niezależne [91,92,93].

Ten sposób podejścia do szacowania błędów estymacji można spotkać w szeregu prac dotyczących pomiarów hałasu komunikacyjnego [94,95].

Należy jednak zauważyć, że w przypadku hałasu ruchu drogowego, gdy okres stacjonarności sygnału jest ograniczony², konieczność uzyskania odpowiednio licznej próby zmusza do próbkowania zależnego, przy którym błąd estymacji jest większy niż przy próbkowaniu niezależnym (przy identycznej liczbie próbek N). Teoretyczne wyznaczenie błędu estymacji wymaga przy próbkowaniu zależnym znajomości wartości funkcji autokowariancji $G(\Delta \tau)$ [91,92], co w warunkach eksperymentalnych jest niezwykle trudne, a także spełnienia założenia o normalności rozkładu chwilowych wartości poziomu hałasu dla dowolnych warunków ruchu, co jest kwestionowane w wielu pracach [98,99,100,101,102].

Uwzględniając powyższe uwagi zdecydowano się na wyznaczenie błędu oszacowania parametrów hałasu komunikacyjnego metodami eksperymentalnymi i porównanie tego błędu z błędem wyznaczonym teoretycznie dla próbkowania niezależnego. Z kolei przyjęcie założenia o próbkowaniu zależnym wymaga wyznaczenia pewnej optymalnej

¹ W rozważaniach pominięto błąd kwantyzacji poziomu, gdyż przy stosowanych szerokościach przedziałów kwantyzacji $\Delta L = 1\text{dB(A)}$ jest on nieistotny [98,99,100].

² Ograniczenie to wynika ze zmiany parametrów ruchu w czasie.

wartości Δt_{op} , gdyż - jak wykazał Fisk [92] - przy tym sposobie próbkowania istnieje odstęp taki, że dalsze jego zmniejszanie, mimo wzrostu liczebności próby, nie powoduje istotnego zmniejszenia błędu.

Niezbędne jest również wyznaczenie minimalnej wartości czasu pomiaru T_g , powyżej którego błąd oszacowania nie maleje w sposób istotny. Jest to ważne ze względu na optymalizację techniki eksperymentu.

Przed realizacją podanych wyżej procedur przetestowano dodatkowo hipotezę o stacjonarności sygnału hałasu komunikacyjnego w okresie jednej godziny¹ oraz hipotezę o normalności rozkładu chwilowych wartości poziomów hałasu. Tę grupę eksperymentów nazywano w dalszej części pracy Eksperymentami II.

3.2.1.2. Eksperymenty II

Eksperyment II.1a - Testowanie hipotezy o stacjonarności hałasu komunikacyjnego w okresie 1 godziny

Przyjęto założenie, że hałas wytwarzany przez strumień pojazdów w punkcie obserwacji O w pobliżu drogi jest ergodycznym stacjonarnym w węższym sensie procesem losowym, a średnie chwilowe parametry ruchu nie zmieniają się zasadniczo w obrębie godziny.

W Eksp. II.1a założenie o stacjonarności sygnału w okresie T_g sprawdzano, testując hipotezę o braku trendu w ciągu wartości $\langle L_{\Delta T_i} \rangle$ wyznaczonych dla kolejnych odcinków czasu ΔT_i , przy czym $T_g = \sum_{i=1}^n \Delta T_i$. Do weryfikacji wykorzystano test serii przyjmując dwustronny obszar krytyczny (k_1, k_2) przy poziomie ufności $\alpha = 0.05$ [88].

Materiałem eksperymentalnym był zbiór sygnałów hałasu o czasie trwania $T_g = 1$ h, zarejestrowanych dla sześciu sytuacji w ruchu na odcinku drogowym. Wybrane odcinki spełniały przyjęte uprzednio założenia (rozdział 2.2.2.) i charakteryzowały się różnym stopniem natężenia ruchu (arterie miejskie i zamiejskie). Czas trwania odcinków ΔT_i wynosił 180 s.

Wyniki testu podano w tabeli 3.1.

¹ Godzinowy czas obserwacji przyjęto w oparciu o przepisy i normy obowiązujące w zakresie oceny uciążliwości hałasu komunikacyjnego.

Tabela 3.1. Wyniki testu serii dla wartości średnich $\langle L \Delta T_1 \rangle$
dla poziomu ufności $\alpha = 0,05$

Odcinek obser- wacji	k	k_1	k_2	Q [poj/h]
1-A _p	7	6	14	1500
2-A _p	7	6	15	660
3-A _p	5 ^x	6	15	700
4-Sz	12	6	15	350
5-A _w	10	6	15	830
6-A _w	10	6	15	590

k - liczba serii wyznaczona w teście

k_1, k_2 - granice obszaru krytycznego

x - istnieje podstawa do odrzucenia hipotezy o stacjonarności sygnału

Uzyskane wyniki wykazały, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o stacjonarności sygnału hałasu komunikacyjnego w okresie jednej godziny, gdyż na sześć badanych przypadków tylko w jednym (droga miejska) istnieje podstawa do odrzucenia tej hipotezy.

Eksperyment II.1b - Testowanie hipotezy o normalności rozkładu chwilowych wartości poziomu hałasu $p(L)$

Testowano hipotezę $H_0 : D(L) \in \mathcal{D}_N$

Stosowano nieparametryczny test istotności χ^2 (rozdział 2.2.3.2, zał. 2.30) na poziomie ufności $\alpha = 0,05$. Test przeprowadzono dla sześciu odcinków obserwacji (jak w Eksp. II.1a). Stwierdzono, że dla występujących na tych odcinkach natężeń ruchu drogowego (300 - 1500)[poj/h] istnieje podstawa do odrzucenia hipotezy H_0 . Uzyskane wyniki wskazują więc, że dla badanych natężeń ruchu nie można przyjąć założenia o normalności rozkładu $p(L)$ i teoretyczne wyznaczenie błędu oszacowania w oparciu o teorię próbkowania będzie obarczone dodatkowym błędem.

Eksperyment II.2 - Badanie optymalnego czasu próbkowania Δt_{op} dla czasów pomiaru $T_s \in \{300, 600, 900, 1200 [s]\}$

W Eksp. II.2 badano sygnały hałasu ruchu drogowego o czasie trwania jednej godziny zarejestrowane dla trzech odcinków

obserwacji różniących się natężeniem ruchu ($Q_1 = 350$ [poj/h], $Q_2 = 660$ [poj/h], $Q_3 = 1500$ [poj/h]).

Z każdego sygnału wylosowano po 30 segmentów o czasie trwania $T_s \in \{300, 600, 900, 1200\}$ [s], które próbkowano w odstępach próbkowania $\Delta t \in \{0,5; 1; 2; 4; 8; 16\}$ [s]. Następnie dla każdej kombinacji ($\Delta t, T_s$) z uzyskanych trzydziestu wartości dla każdego parametru hałasu ze zbioru $\{L\}$: $\{L_{eq}, \langle L \rangle, L_{10}, L_{50}, L_{90}, T_{NI}, L_{NP}\}$ utworzono odpowiednie rozkłady $p(\theta)$, gdzie: θ - dowolny parametr ze zbioru $\{L\}$.

Przy uwzględnieniu przyjętych uprzednio założeń o stacjonarności sygnału (Eksp. II.1a) oraz o niezmienności parametrów ruchu dla czasu obserwacji $T_s = 1h$, uzyskane rozkłady $p(\theta)$ można traktować jako rozkłady estymatorów parametrów hałasu ze zbioru $\{L\}$.

Kryterium optymalnego wyboru wartości Δt i T_s był wybór maksymalnej wartości Δt i minimalnej wartości T_s , dla których błąd oszacowania² $\Delta \bar{\theta}$ nie różnił się w istotny sposób od błędu minimalnego.

$$K_{opt} : \begin{cases} \Delta t \rightarrow \max \\ T_s \rightarrow \min \\ \Delta \bar{\theta} \sim \Delta \bar{\theta}_{min} \end{cases} \quad (3.1)$$

Jako błąd oszacowania $\Delta \bar{\theta}$ przyjęto szerokość przedziału $(\bar{\theta}_p, \bar{\theta}_k)$ spełniającego warunek:

$$P(\bar{\theta}_p < \theta \leq \bar{\theta}_k) = 0.9 \quad (3.2)$$

wobec tego

$$\Delta \bar{\theta} = \bar{\theta}_k - \bar{\theta}_p$$

Wyniki eksperymentu w postaci wykresów¹ zależności:

$$\Delta \bar{\theta} = f(\Delta t) | T_s \in \{300, 600, 900, 1200\} [s] \quad (3.3)$$

przedstawiono na rysunkach 3.2 - 3.8, gdzie każdy z trzech badanych sygnałów hałasu drogowego opisano odchyleniem standardowym

σ_L rozkładu chwilowych wartości poziomów hałasu $p(L)$. Ponadto na rysunkach 3.3. - 3.8 dla czasu $T_s \in \{300, 1200\}$ [s] linią przerywaną zaznaczono wykres funkcji (3.3) wyliczonej teoretycznie z zależności 3.4, przy założeniu niezależności próbkowania.

$$\Delta \theta = 2 C_{\theta} t_{\alpha} \sigma_L / \sqrt{T_s / \Delta t} \quad (3.4)$$

gdzie: t_{α} - wartość z rozkładu t-Studenta dla $\alpha = 0,1$ i $N = 30$,

σ_L - odchylenie standardowe rozkładu $p(L)$, przy czym przyjęto $\sigma_L = S_L$ (estymator z próby),

¹ Na wykresach czas T_s podano w minutach.

² Symbol z kreską u góry ($\bar{\theta}$) - wielkość wyznaczona na podstawie pomiaru.

C_θ - współczynnik zależny od rodzaju parametru θ . Wartości C_θ podano¹ w tabeli 3.2.

Tabela 3.2.

Parametr	L	L ₁₀	L ₅₀	L ₉₀	TNI	L _{NP}
C_θ	1	1,71	1,25	1,71	8	2,4

Analiza wykresów z rysunków 3.2 - 3.8 wykazuje, że dla $\Delta t > 1[s]$ występuje wyraźny wzrost błędu $\Delta\bar{\theta}$, natomiast dla $\Delta t < 1[s]$ następuje stabilizacja błędu, a występujące wahania należy przypisać błędom pomiaru. Wobec tego do dalszych badań przyjęto wartość $\Delta\bar{t}_{op} = 1s$.

Eksperyment II.3 - Badanie optymalnego czasu pomiaru T_s dla $\Delta t = \Delta\bar{t}_{op}$

W Eksp. II.3 dla wybranej wartości $\Delta\bar{t}_{op}$ badano wpływ czasu obserwacji T_s na wartość błędu $\Delta\theta$. Zbiór dyskretnych wartości czasu T_s , kryterium optymalizacji K_{opt} (3.1) oraz definicje błędów (3.2) przyjęto identycznie jak w Eksp. II.2. Rozszerzono natomiast zbiór odcinków obserwacji (czyli badanych sygnałów) do sześciu.

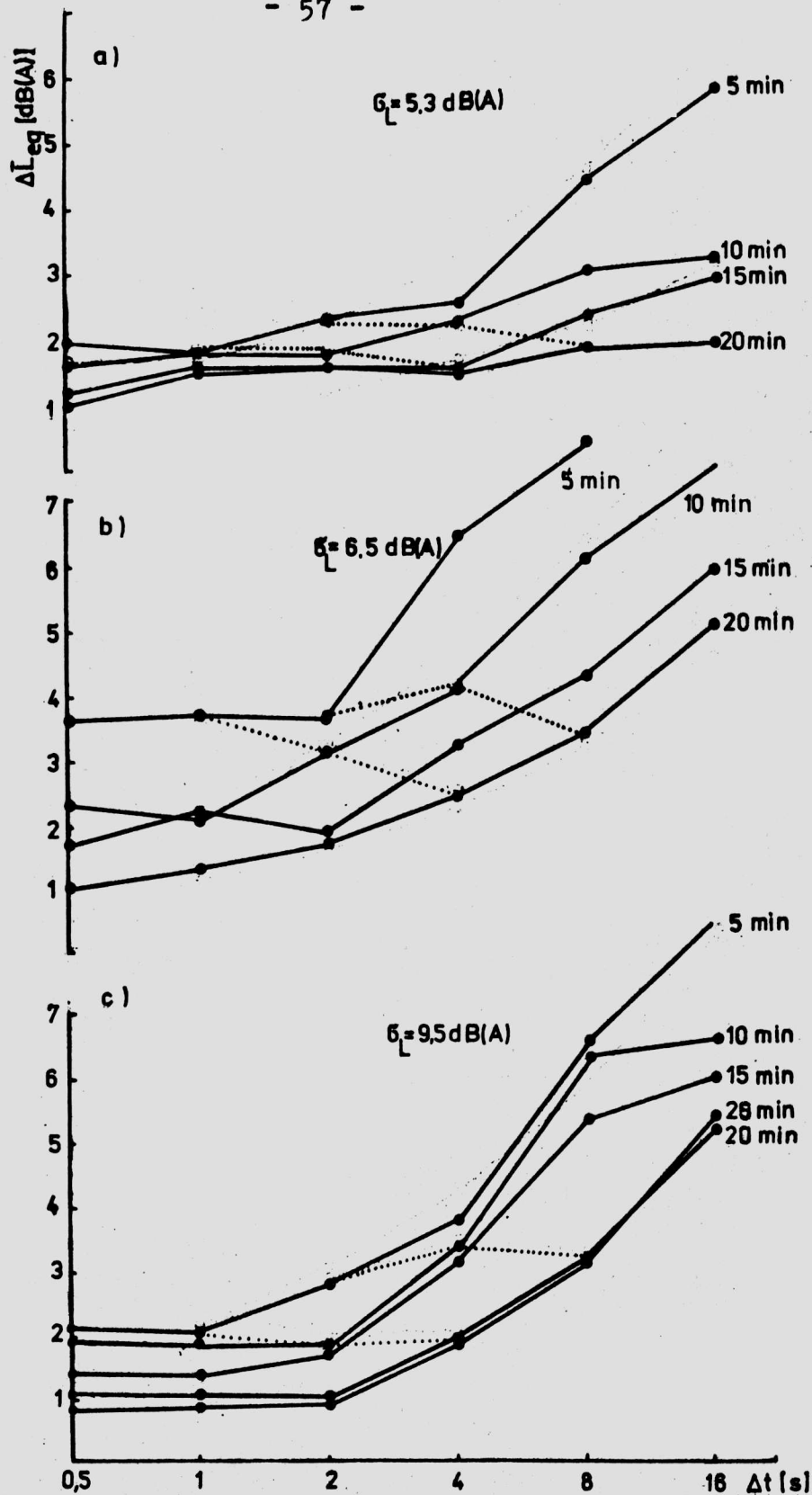
Wyniki w postaci graficznej prezentacji zależności:

$$\Delta\bar{\theta} = f(T_s) \mid \Delta t = \Delta\bar{t}_{op} \quad (3.5)$$

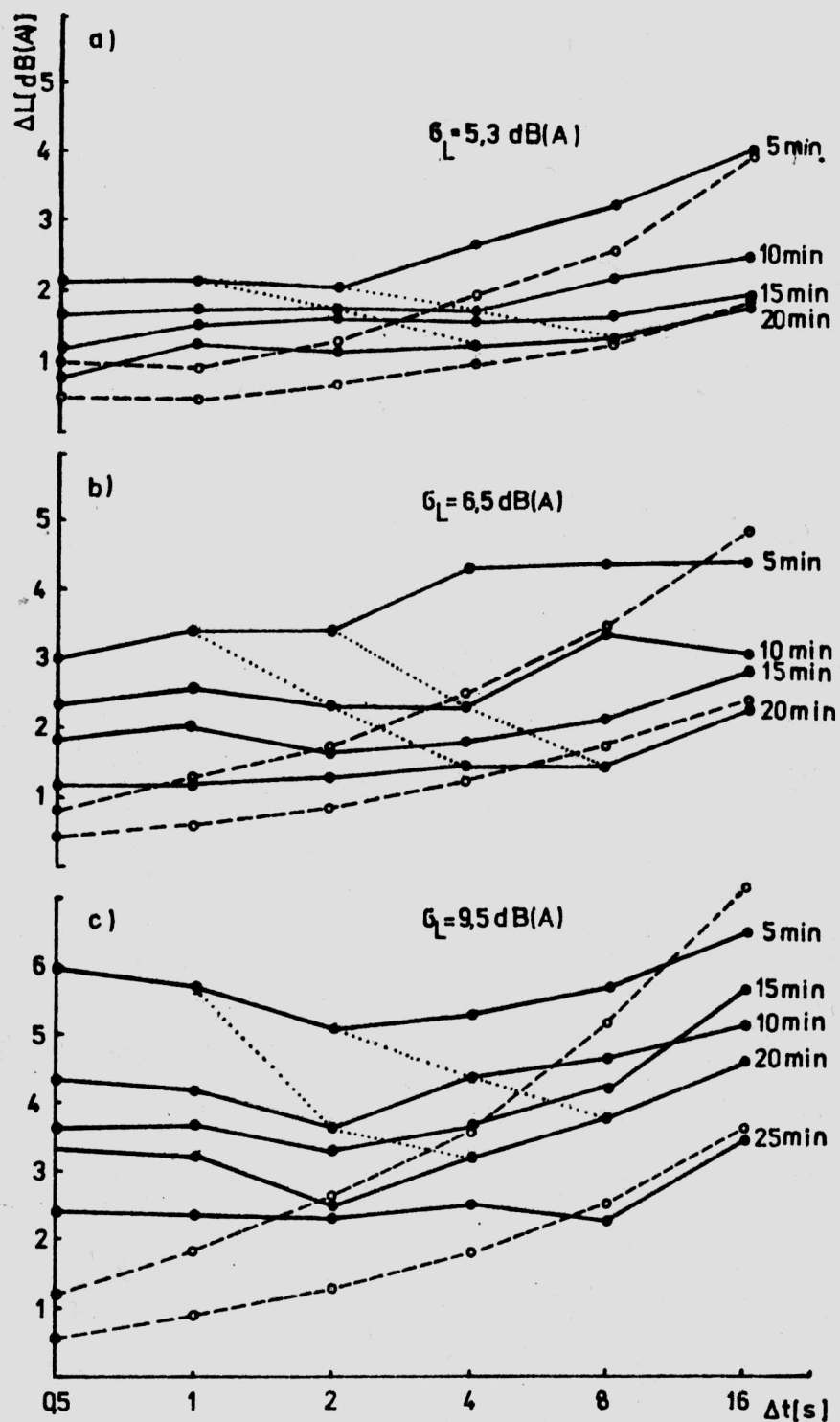
przedstawiono na rysunkach 3.9 i 3.10. Analiza wykresów z rys. 3.9 i 3.10 wykazuje, że błąd oszacowania jest funkcją monotonicznie malejącą ze wzrostem czasu T_s . W odróżnieniu od zależności $\Delta\bar{\theta} = f(\Delta t)$ nie występuje tu wyraźnie obszar stabilizacji błędu. Prawidłowością jest jednak wyraźne malenie nachylenia krzywej $\Delta\bar{\theta} = f(T_s)$ dla wartości $T_s > 900[s]$. Uwzględniając dodatkowo wymogi narzucone przez kryterium K_{opt} zdecydowano do dalszych badań przyjmując² $T_{opt} = 900[s]$.

¹ Przy przyjętym założeniu o normalności rozkładu $p(L)$ wartości chwilowych natężeń hałasu nie mają rozkładu normalnego [16]. Z tego względu nie wyliczono zależności teoretycznej dla poziomu równoważnego L_{eq}

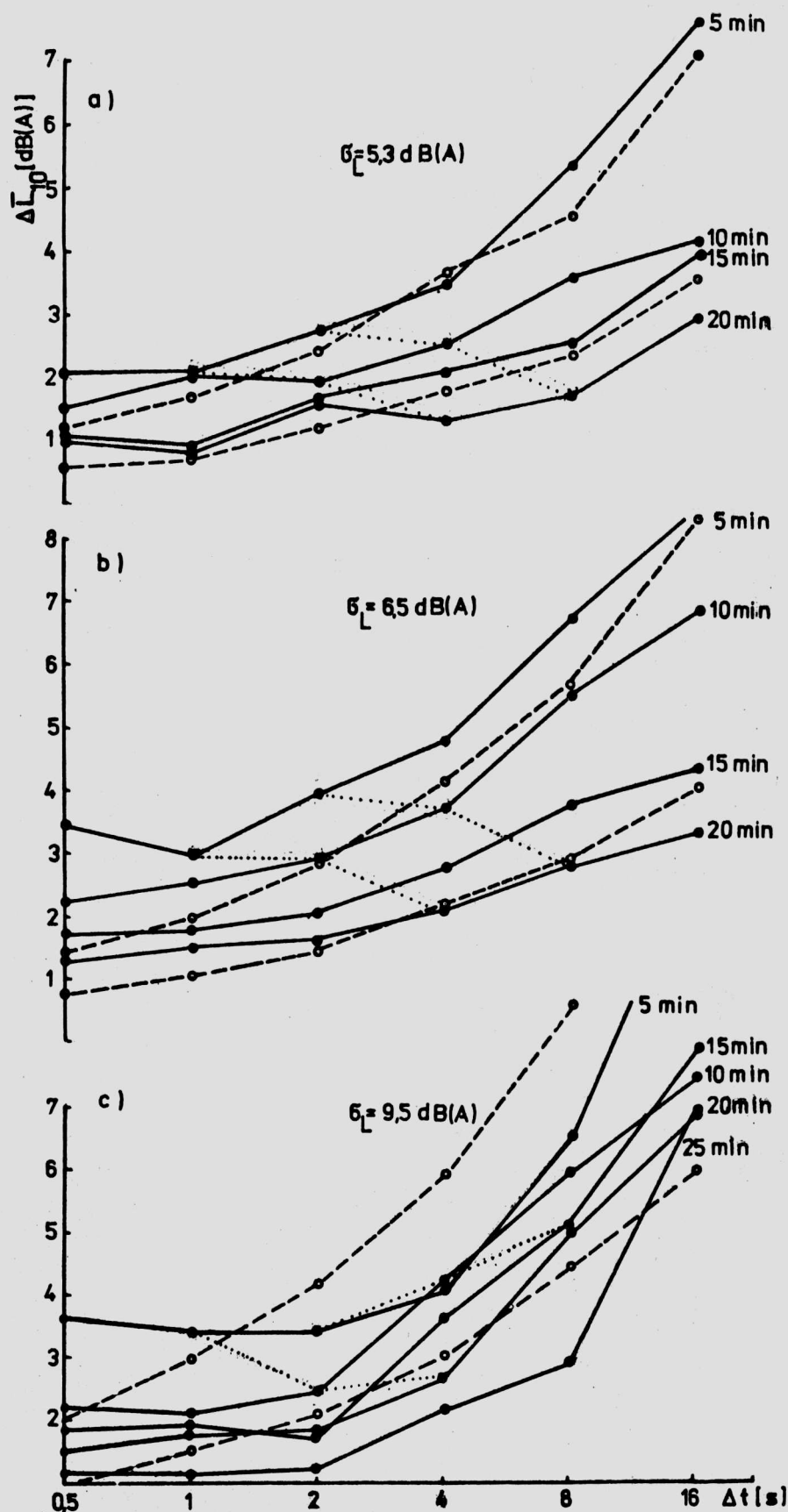
² Aczkolwiek błąd uzyskany dla $T_s = 1200 s$ byłby mniejszy.



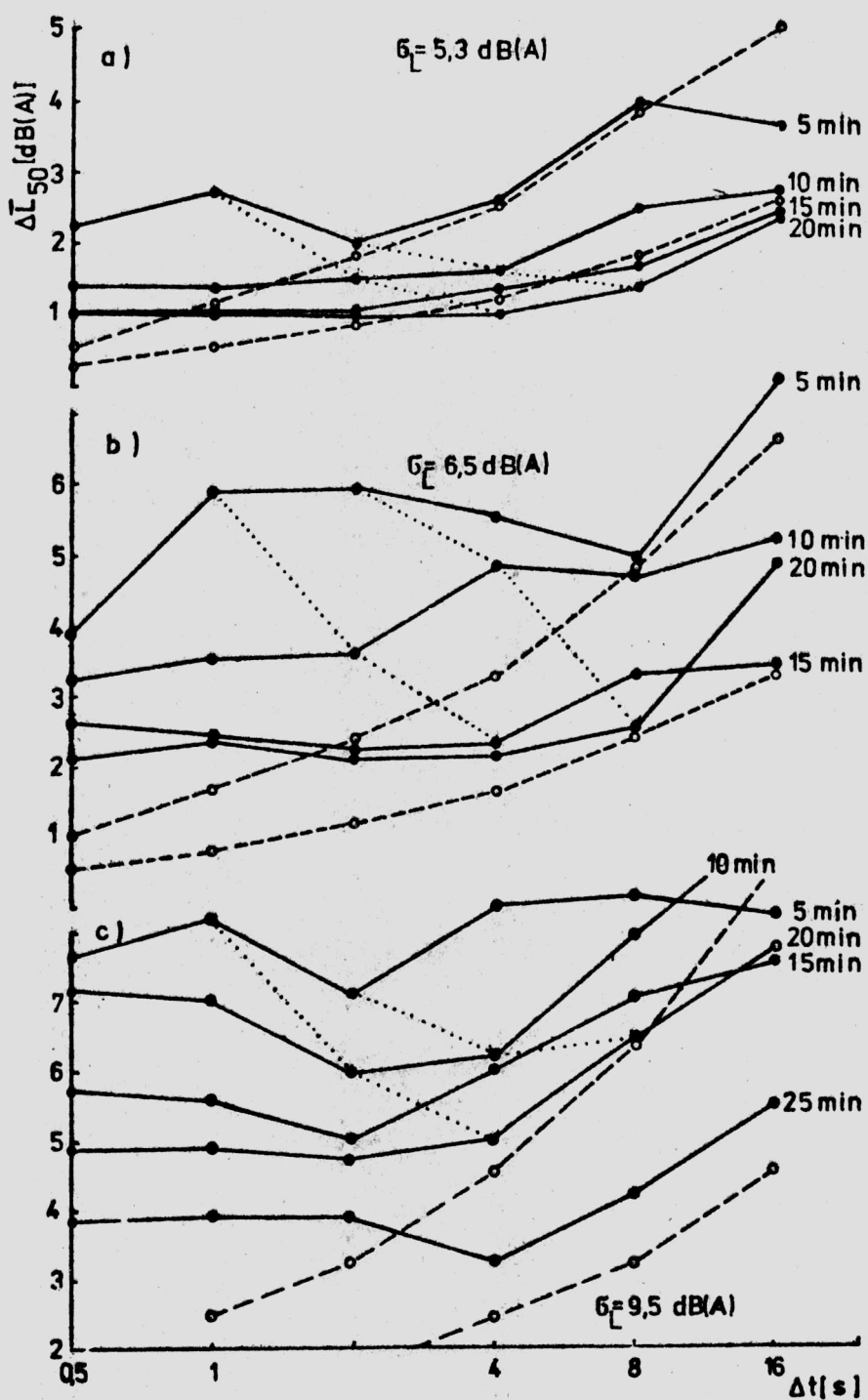
Rys. 3.2. Przebieg błędu pomiaru poziomu równoważnego $\Delta \bar{L}_{eq}$ w funkcji okresu próbkowania Δt , dla czasu trwania sygnału $T_g \in \{5, 10, 15, 20\}$ [min] (zał. 3.3). - Linia kropkowaną (.....) połączono punkty wyznaczone dla jednakowej liczby próbek $N = T_g / \Delta t$. a) - natężenie ruchu $Q=1500$ [poj/h]; b) - $Q=660$ [poj/h]; c) - $Q=350$ [poj/h].



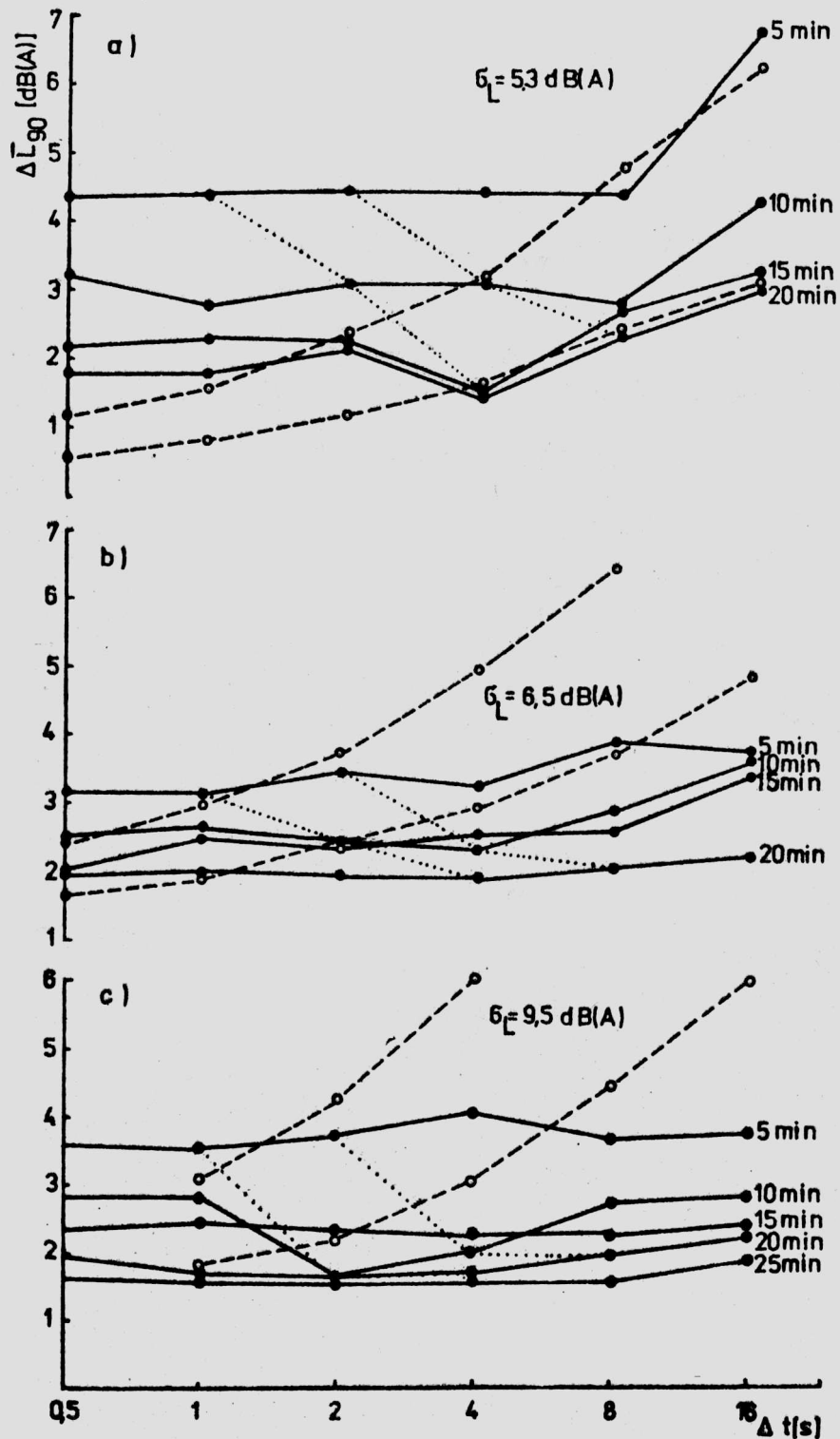
Rys. 3.3. Przebieg błędu pomiaru poziomu średniego $\langle \bar{L} \rangle$ w funkcji okresu próbkowania Δt , dla czasu trwania sygnału $T_g \in \{5, 10, 15, 20\}$ [min] (zal. 3.3.). Linia przerywaną (-----) zaznaczono przebieg błędu wyznaczonego teoretycznie dla próbkowania niezależnego dla $T_g \in \{5, 20\}$ [min] (zal. 3.4), linią kropkowaną (.....) połączono punkty odpowiadające jednakowej liczbie próbek $N = T_g / \Delta t$. - a) - natężenie ruchu $Q = 1500$ [poj/h]; b) - $Q = 660$ [poj/h]; c) - $Q = 350$ [poj/h].



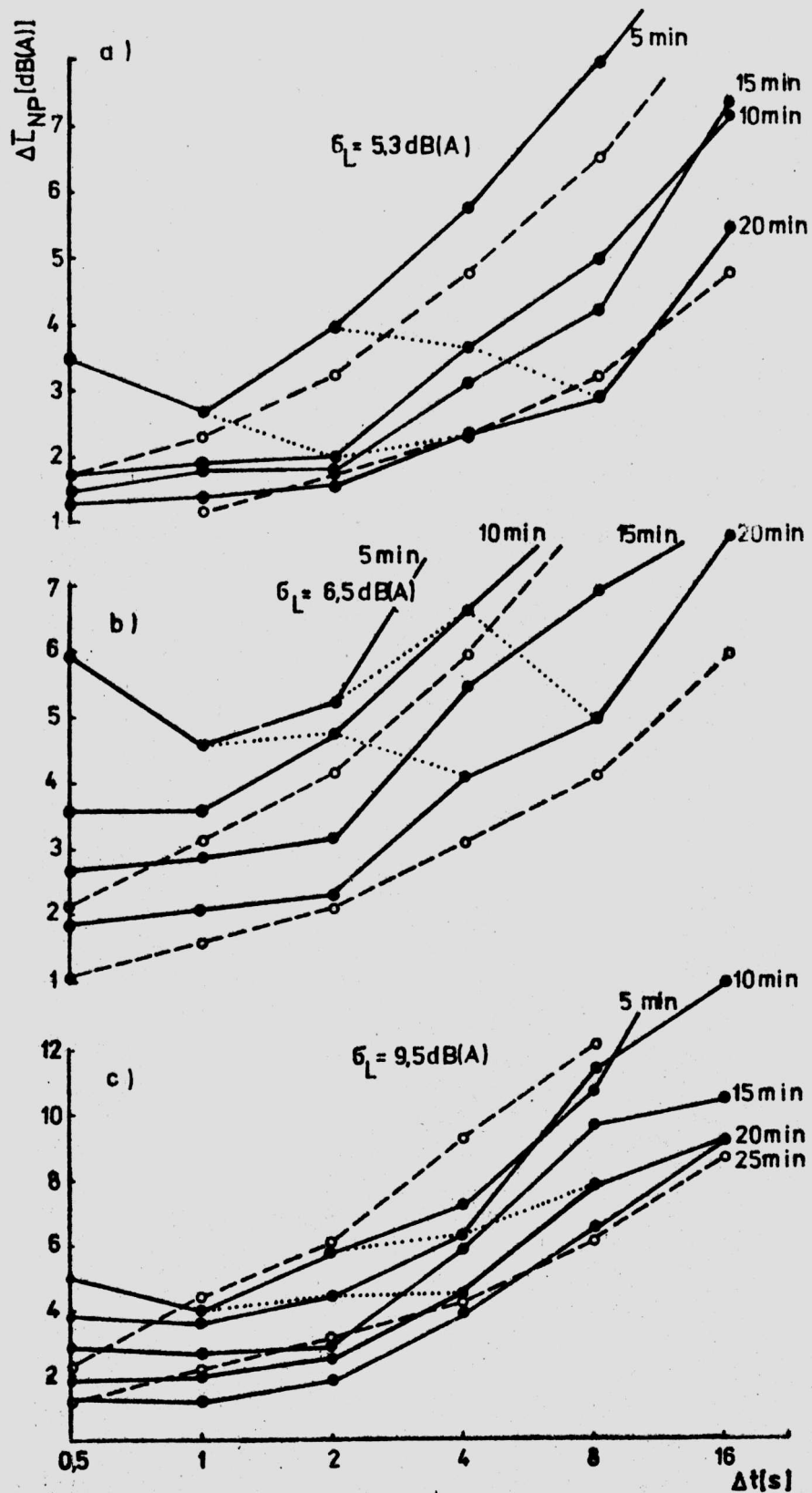
Rys. 3.4. Przebieg błędu pomiaru poziomu quasimaksymalnego $\Delta \bar{L}_{10}$ w funkcji okresu próbkowania Δt dla czasu trwania sygnału $T_s \in \{5, 10, 15, 20\}$ [min] (zał. 3.3) - linia ciągła.
a) - natężenie ruchu $Q=1500$ [poj/h]; b) - $Q=660$ [poj/h]; c) - $Q=350$ [poj/h]. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 3.3.



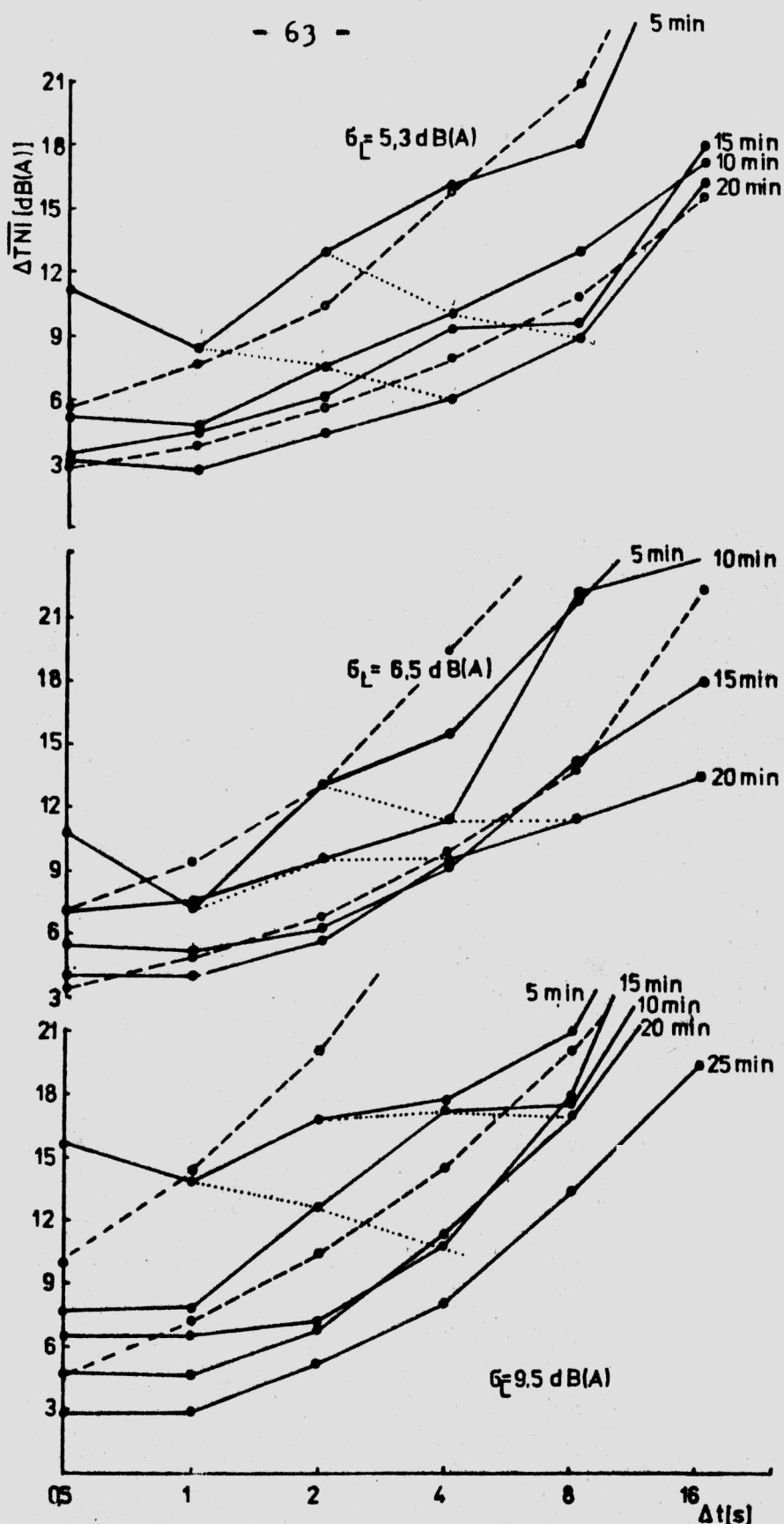
Rys. 3.5. Przebieg błędu pomiaru mediany rozkładu $\Delta \bar{L}_{50}$ w funkcji okresu próbkowania Δt dla czasu trwania sygnału $T_s \in \{5, 10, 15, 20\} [\text{min}]$ (zał. 3.3) - linia ciągła. a) - natężenie ruchu $Q=1500 [\text{poj/h}]$; b) - $Q=660 [\text{poj/h}]$; c) - $Q=350 [\text{poj/h}]$. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 3.3.



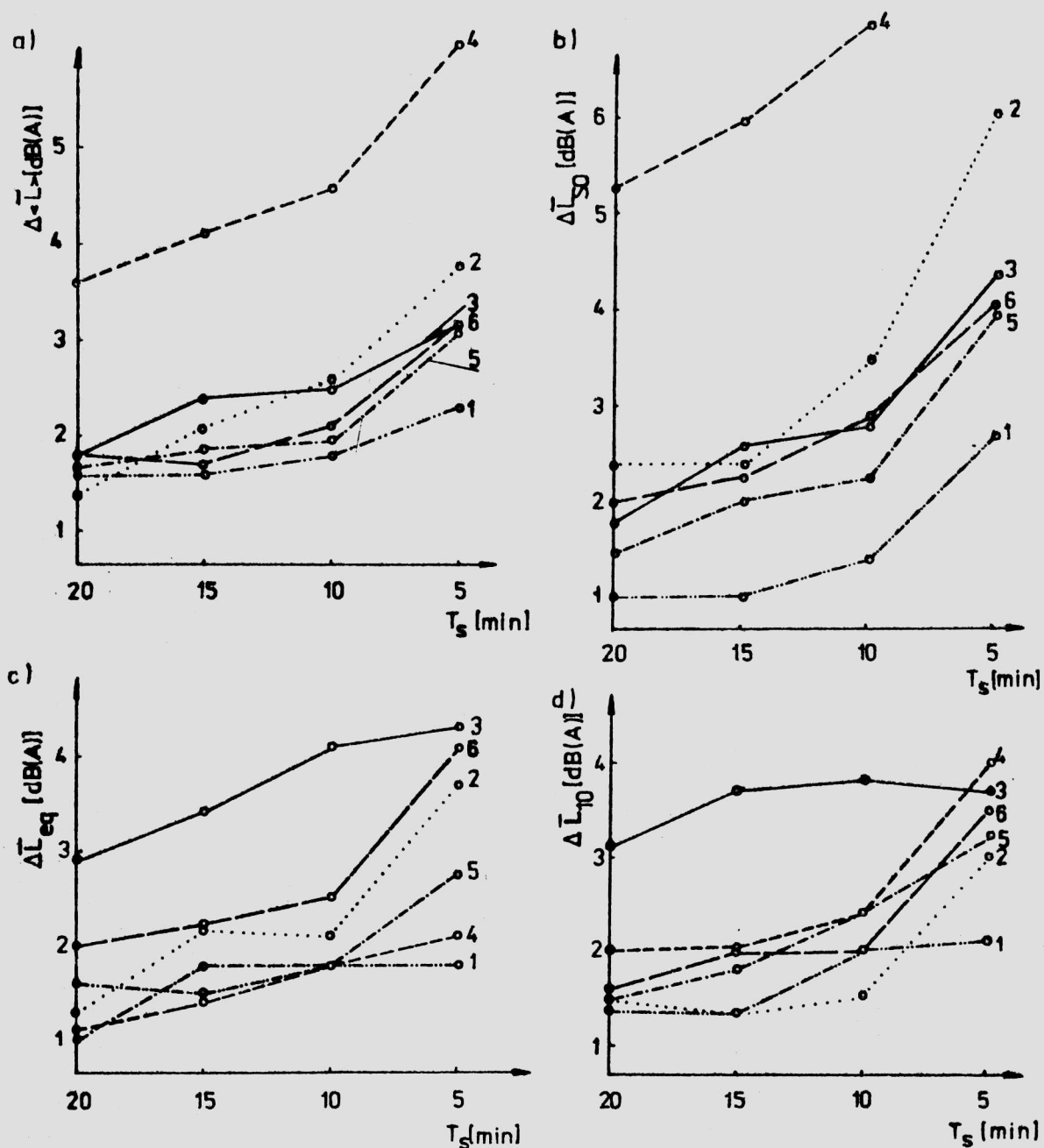
Rys. 3.6. Przebieg błędu pomiaru poziomu quasinimalnego $\Delta \bar{L}_{90}$ w funkcji okresu próbkowania Δt dla czasu trwania sygnału $T_g \in \{5, 10, 15, 20\}$ [min] (zał. 3.3) - linia ciągła.
a) - natężenie ruchu $Q = 1500$ poj/h; b) - $Q = 660$ poj/h; c) - $Q = 350$ poj/h. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 3.3.



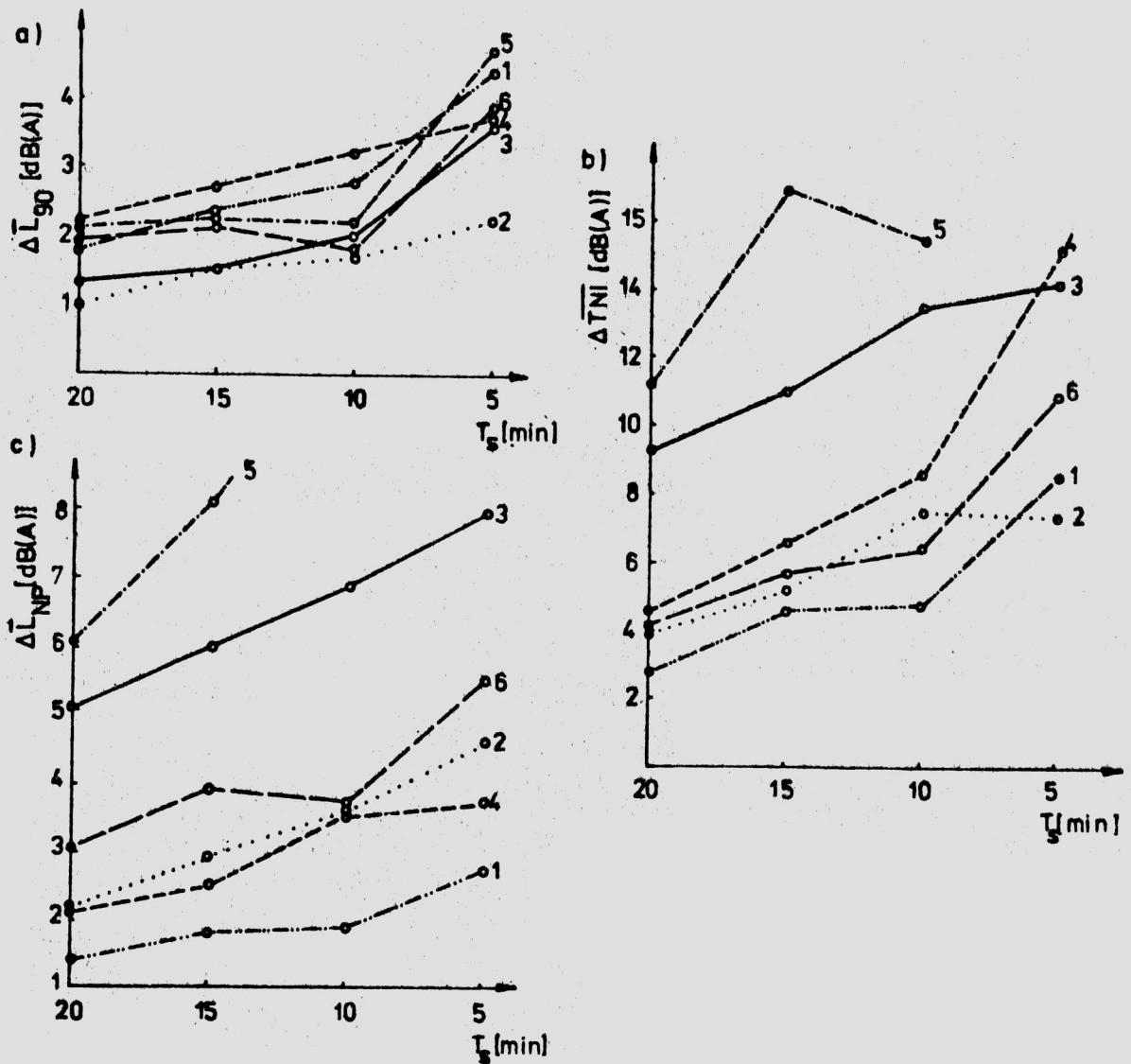
Rys. 3.7. Przebieg błędu pomiaru poziomu skażenia hałasem $\Delta \bar{L}_{NP}$ w funkcji okresu próbkowania Δt dla czasu trwania sygnału $T_s \in \{5, 10, 15, 20\}$ [min] (zał. 3.3) - linia ciągła
a) - natężenie ruchu $Q=1500$ poj/h; b) - $Q=660$ poj/h; c) - $Q=350$ poj/h. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 3.3.



Rys. 3.8. Przebieg błędu pomiaru wskaźnika oceny hałasu ΔT_{NI} w funkcji okresu próbkowania Δt dla czasu trwania sygnału $T_g \in \{5, 10, 15, 20\}$ [min] (zał. 3.3) - linia ciągła. - a) - natężenie ruchu $Q=1500$ poj/h; b) - $Q=660$ poj/h; c) - $Q=350$ poj/h. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 3.3.



Rys. 3.9. Przebieg błędu pomiaru: a) - poziomu średniego $\Delta \langle \bar{L} \rangle$; b) - mediany rozkładu $\Delta \bar{L}_{50}$; c) - poziomu równoważnego $\Delta \bar{L}_{eq}$; d) - poziomu quasimaksymalnego $\Delta \bar{L}_{10}$ w funkcji czasu trwania sygnału T_s dla $\Delta t = \Delta \bar{t}_{op} = 1[s]$ (zal. 3.5).
 1 - $Q=1500$ poj/h, $\bar{G}_L=5.3$ dB(A); 2 - $Q=660$ poj/h, $\bar{G}_L=6.5$ dB(A);
 3 - $Q=700$ poj/h, $\bar{G}_L=6.2$ dB(A); 4 - $Q=350$ poj/h, $\bar{G}_L=9.5$ dB(A);
 5 - $Q=830$ poj/h, $\bar{G}_L=6.5$ dB(A); 6 - $Q=590$ poj/h, $\bar{G}_L=6.5$ dB(A)



Rys. 3.10. Przebieg błędu pomiaru: a) - poziomu quasisminimalnego $\Delta \bar{L}_{90}$; b) - wskaźnika oceny hałasu $\Delta \bar{TN1}$; c) - poziomu skażenia hałasem $\Delta \bar{L}_{NP}$ w funkcji czasu trwania sygnału T_s dla $\Delta t = \Delta \bar{t}_{op} = 1$ s (zal. 3.5.). 1 - $Q=1500$ poj/h, $\bar{G}_L=5.3$ dB(A); 2 - $Q=660$ poj/h, $\bar{G}_L=6.5$ dB(A); 3 - $Q=700$ poj/h, $\bar{G}_L=6.2$ dB(A); 4 - $Q=350$ poj/h, $\bar{G}_L=9.5$ dB(A); 5 - $Q=830$ poj/h, $\bar{G}_L=6.5$ dB(A); 6 - $Q=590$ poj/h, $\bar{G}_L=6.5$ dB(A)

3.2.1.3. Wnioski i podsumowanie Eksperymentów II

Dodatkowa analiza zależności przedstawionych na rysunkach 3.9 i 3.10 wykazała:

- uszeregowanie błędów oszacowania poziomu średniego $\Delta\langle\bar{L}\rangle$ oraz mediany $\Delta\bar{L}_{50}$ na przekroju $T_8 = T_{opt}$ wskazuje na silny związek pomiędzy bezwzględną wartością błędu $\Delta\bar{\theta}$ a odchyleniem standardowym σ_L rozkładu poziomu hałasu $p(L)$, a więc także z natężeniem ruchu wyrażonym w liczbie pojazdów na godzinę. Jest to zgodne z rozważaniami teoretycznymi [92,95,96],

- błąd szacowania parametru pozycyjnego $\Delta\bar{L}_{10}$ oraz poziomu równoważnego $\Delta\bar{L}_{eq}$ nie jest wyraźnie powiązany z odchyleniem standardowym σ_L rozkładu $p(L)$, co z kolei jest niezgodne z rozważaniami teoretycznymi. Stwierdzono natomiast, że błąd ten związany jest z liczbą serii wyznaczoną przy testowaniu stacjonarności sygnału (por. tab. 3.1 i rys. 3.9), przy czym dla zbliżonych wartości σ_L błąd $\Delta\bar{\theta}$ jest tym większy, im mniejszą liczbę serii uzyskano w teście.

Wobec powyższego dla parametrów L_{10} i L_{eq} zdecydowano przyjmując jedną wartość ogólnego oszacowania błędów estymacji $\Delta\bar{\theta}_{max}$, natomiast dla pozostałych parametrów przyjęto wartość $\Delta\bar{\theta}_{max}$ dla trzech zakresów natężenia ruchu (300, 500-1000, 1000[poj/h]). Przyjęte wartości $\Delta\bar{\theta}_{max}$ podano w tabeli 3.3.

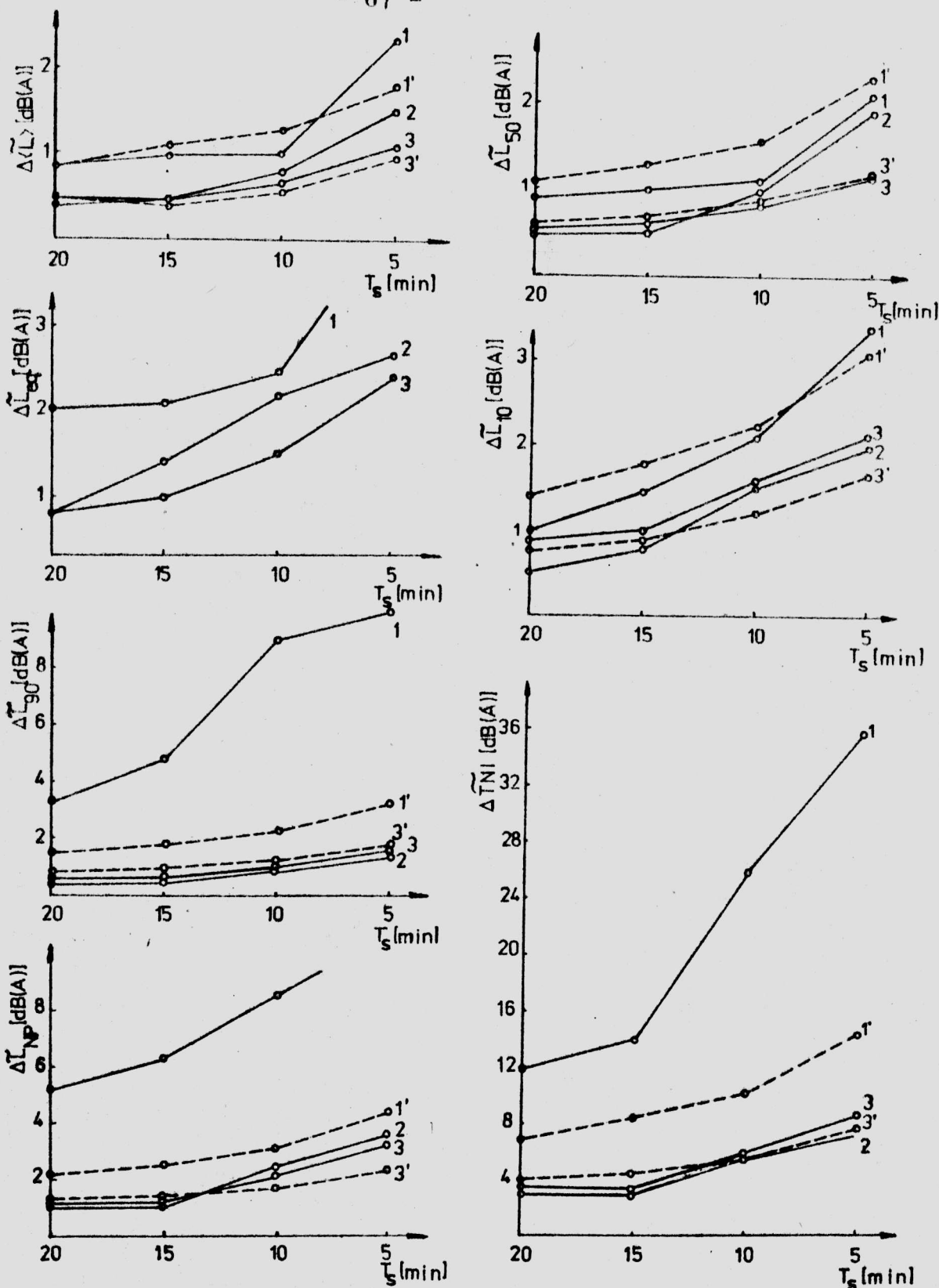
Tabela 3.3. Wartości ogólnego oszacowania błędów estymacji $\Delta\bar{\theta}_{max}$ parametrów hałasu, otrzymane na podstawie pomiarów eksperymentalnych dla trzech zakresów natężeń ruchu Q [poj/h]

Q	σ_L^x	$\Delta\bar{\theta}_{max}$ [dB(A)]						
		L_{eq}	$\langle L \rangle$	L_{10}	L_{50}	L_{90}	TNI	L_{NP}
1000	5-6	2.5	2	2.5	1.5	3	6	3
500-1000	6-8	2.5	3	2.5	3.5	3	8	5
500	8	2.5	5	2.5	7	3	8	5

^x - typowe wartości odchylenia standardowego σ_L rozkładu poziomów hałasu $p(L)$ dla danego zakresu natężeń ruchu Q

3.2.2. Oszacowanie błędu symulacji

Przyjęto metodę szacowania błędu symulacji w oparciu o rozkład wyników uzyskanych dla 30 realizacji symulacji przy tych



Rys. 3.11. Przebieg błędów estymacji parametrów hałasu ze zbioru $\{L\}$ wyznaczonych dla procesu symulacji, w funkcji czasu trwania sygnału T_s dla $\Delta t = \Delta \tilde{t}_{op}$ - linia ciągła. Linia przerywaną zaznaczono przebieg błędu estymacji wyznaczony teoretycznie dla próbkowania niezależnego. 1, 1' - $Q = 350$ poj/h, $\bar{\sigma}_L = 9.1$ dB(A); 2 - $Q = 660$ poj/h, $\bar{\sigma}_L = 6.6$ dB(A); 3, 3' - $Q = 1500$ poj/h, $\bar{\sigma}_L = 5.2$ dB(A)

samych parametrach wejściowych modelu. Procedurę powtarzano dla trzech zestawów parametrów wejściowych odpowiadających trzem od-
cinkom obserwacji z Eksp. II.2.

Optymalny czas próbkowania w modelu symulacyjnym $\Delta \tilde{t}_{op}$ przy-
jęto identycznie jak dla badań eksperymentalnych, czyli:

$\Delta \tilde{t}_{op} = \Delta \bar{t}_{op} = 1 \text{ s}$. Definicję błędów¹ $\Delta \tilde{\theta}$ przyjęto jak w Eksp. II.2
(3.2). Eksperymenty symulacyjne przeprowadzono dla $T_s \in \{300, 600, 900, 1200\} [\text{s}]$.

Wyniki w postaci wykresów zależności:

$$\Delta \tilde{\theta} = f(T_s) \Big| \Delta t = \Delta \tilde{t}_{op} \quad (3.5a)$$

pokazano na rysunku 3.11. Analiza wyników wykazuje, że o ile ja-
kościowe związki zbliżone są do uzyskanych w Eksp. II.2, to bez-
względne wartości błędów szacowania są wyraźnie mniejsze i zbli-
żone do wartości $\Delta \theta$. Wartości odgórnego oszacowania błędów
estymacji $\Delta \tilde{\theta}_{max}$ podano w tabeli 3.4.

Tabela 3.4. Wartości odgórnego oszacowania błędów estymacji
 $\Delta \tilde{\theta}_{max}$ parametrów hałasu wyznaczonych w procesie sy-
mulacji

Q [poj/h]	$\tilde{\sigma}_L$ [dB(A)]	$\Delta \tilde{\theta}_{max} [\text{dB(A)}]$						
		L_{eq}	$\langle L \rangle$	L_{10}	L_{50}	L_{90}	TNI	L_{NP}
100	5-6	1.5	1	1	1	1	3	1
500-1000	6-8	1.5	1	1.5	1	1.5	3.5	1.5
500	>8	2	1.5	1.5	1.5	5	14	6.5

3.2.3. Sformułowanie kryterium weryfikacji

W sformułowanym wę wstępie ogólnym założeniu dotyczącym we-
ryfikacji przyjęto porównywanie wartości parametrów otrzymanych
z pomiaru eksperymentalnego z wartościami tych parametrów genero-
wanymi przez model. Ponieważ w tej części pracy należy podjąć
decyzję, który z zaproponowanych wariantów modelu (reguła RG1)
przyjmujemy za ostateczny, oraz czy przyjęty wariant spełnia zało-
żoną dokładność, celowe jest sformułowanie dwóch kryteriów:

¹ Symbol z łuczkiem ($\sim$) u góry - wielkość wyznaczona w pro-
cesie symulacji.

kryterium KW1:

$$\left\{ \begin{array}{l} S(\bar{\theta}, \bar{\theta}) \longrightarrow \min \\ \langle \Delta(\bar{\theta}, \bar{\theta}) \rangle \longrightarrow 0 \end{array} \right\} \quad (3.6a)$$

gdzie:

$$S(\bar{\theta}, \bar{\theta}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{\theta} - \bar{\theta})^2} \quad (3.6b)$$

$$\langle \Delta \bar{\theta}, \bar{\theta} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{\theta} - \bar{\theta}) \quad (3.6c)$$

kryterium KW2:

$$\begin{aligned} \langle \delta \Psi \rangle &= \langle \Delta(\bar{\theta}, \bar{\theta}) \rangle < 1 \text{ dB} \\ \sigma_{\Psi} &\sim \sqrt{\sigma_{\bar{\theta}}^2 + \sigma_{\tilde{\theta}}^2} \end{aligned} \quad (3.7)$$

gdzie:

$\langle \delta \Psi \rangle$ - wartość średnia błędu modelu wynikającego z niedoskonałości modelu,

σ_{Ψ} - odchylenie standardowe rozkładu błędu modelu,

$\sigma_{\bar{\theta}}, \sigma_{\tilde{\theta}}$ - odchylenie standardowe rozkładu błędu estymacji parametru θ , odpowiednio dla pomiaru i symulacji.

Przy wyborze wariantów reguły RG1 stosowano kryterium KW1, a przy ostatecznej weryfikacji modelu kryterium KW2.

3.3. Eksperymentalna weryfikacja modelu

3.3.1. Wybór ostatecznego wariantu modelu

Eksperymenty weryfikacyjne przeprowadzono dla 30 różnorodnych odcinków ruchu drogowego¹, spełniających w przybliżeniu przyjęte w pracy założenia. Sposób pomiaru i analizy był zgodny z ustaleniami dokonanymi w poprzednich rozdziałach (tzn. czas pomiaru $T_s = 900$ s, odstęp próbkowania $\Delta t = 1$ s). Dla każdego

¹ Tzn. dla odcinków o różnej liczbie pasów ($m \in \{2, 6\}$) o różnym charakterze komunikacyjnym (arterie miejskie przelotowe i wyłotowe, szosy) oraz o różnym natężeniu ruchu $Q \in \{350, 2300\}$ [poj/h]

odcinka zmierzono parametry ruchu i wprowadzono jako dane do modelu. Przy opisie sytuacji w modelu symulacyjnym założono, że pas jezdni o szerokości ~ 7 m stanowi jedną linię ruchu, a park pojazdów dzieli się na trzy klasy. Granice odcinka obserwacji $(x_p; x_k)$ w modelu symulacyjnym wyznaczono przyjmując kryterium:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bigwedge_{i \in S} \bigwedge_{j \in S} \{ L_{i,\min}(0) - L_{j,\max}(x_k) \geq 10 \text{ dB(A)} \} \\ \bigwedge_{i \in S} \bigwedge_{j \in S} \{ L_{i,\max}(0) - L_{j,\min}(0) \geq 10 \text{ dB(A)} \} \\ \bigwedge_{i \in S} \{ L_i(x_p) = L_i(x_k) \} \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

gdzie:

$L_{i,\min}(x)$ - poziom hałasu pochodzącego od źródła punktowego ze zbioru S o minimalnej mocy akustycznej znajdującego się w punkcie x , mierzony w punkcie obserwacji

$L_{i,\max}(x)$ - poziom hałasu pochodzącego od źródła o maksymalnej mocy akustycznej.

Wygenerowane przez model symulacyjny parametry hałasu ze zbioru:

$$\{ \tilde{L} \} : \{ \tilde{L}_{eq}, \langle \tilde{L} \rangle, \tilde{L}_{10}, \tilde{L}_{50}, \tilde{L}_{90} \} \quad (3.9a)$$

porównano w sensie kryterium KW1 (3.6) ze zbiorem parametrów zmierzonych:

$$\{ \bar{L} \} : \{ \bar{L}_{eq}, \langle \bar{L} \rangle, \bar{L}_{10}, \bar{L}_{50}, \bar{L}_{90} \} \quad (3.9b)$$

Wyniki obliczeń dla poszczególnych wariantów reguły RG1 podano w tabeli 3.5 w wierszach oznaczonych RG1d, RG1p i RG1p/d. Rozpatrując otrzymane wyniki, przy stosowaniu kryterium KW1, można stwierdzić, że najlepsze rezultaty uzyskano dla wariantu RG1d/p, jednak uzyskane wartości średnie różnic $\langle \Delta(\tilde{L}) \rangle$ (3.6c) różnią się wyraźnie od zera. Kryterium KW1 nie jest zatem spełnione w sposób zadowalający. Wobec tego zdecydowano się zweryfikować wariant RG1p/d przy założeniu, że każdy pas jezdni stanowi oddzielną linię ruchu. Ponadto dla wariantu RG1p/d dokonano eksperymentu symulacji, przyjmując podział parku pojazdów na dwie klasy i wprowadzając do reguły RG1p/d następujące wartości parametrów:

klasa lekka: $a_k = 18 \text{ dB(A)}$, $b_k = 60 \text{ dB(A)}$, $\sigma_k = 3 \text{ dB(A)}$
klasa ciężka: a_k, b_k, σ_k jak w tabeli 2.6..

Wyniki zamieszczone w tabeli 3.5 w wierszach RG1p/d-Z (wariant, gdzie każdy pas ruchu stanowi linię ruchu) oraz RG1p/d-2K (wariant z podziałem na dwie klasy).

Analiza otrzymanych wyników wykazuje, że zastosowanie podziału na dwie klasy prowadzi do pogorszenia otrzymanych wyników, szczególnie dla parametru L_{90} , natomiast wariant RG1p/d-Z pozwolił na uzyskanie wartości średniej $\langle \Delta(\bar{\theta}, \tilde{\theta}) \rangle$ znacznie bliższej zero niż poprzednie warianty, przy nieistotnych zmianach odchylenia $S(\bar{\theta}, \tilde{\theta})$,

W konsekwencji przyjęto, że ostatecznym wariantem modelu jest model z regułą RG1p/d, przy podziale pojazdów na trzy klasy oraz z traktowaniem każdego pasa jezdni o szerokości ~3.5 m jako jednej linii ruchu.

Tabela 3.5. Wyniki weryfikacji wariantów modelu według kryterium KW1 (3.6a)

wariant pa- rametr hałasu		RG1d	RG1p	RG1p/d	RG1p/d-Z	RG1p/d-2K
$S(\bar{\theta}, \tilde{\theta})$ [dB(A)]	L_{eq}	2.951	1.615	1.312	1.358	1.610
	$\langle L \rangle$	1.824	1.580	1.680	1.769	1.811
	L_{10}	2.956	1.984	1.858	1.455	1.941
	L_{50}	1.940	1.732	1.758	1.657	2.045
	L_{90}	3.940	3.208	3.672	3.575	9.378
$\langle \Delta(\bar{\theta}, \tilde{\theta}) \rangle$ [dB(A)]	L_{eq}	-2.70	-1.213	-0.577	0.190	-0.782
	$\langle L \rangle$	-0.403	-0.397	0.196	0.373	-0.067
	L_{10}	-2.50	-1.56	-1.06	-0.394	-1.30
	L_{50}	-0.573	-0.609	0.017	0.123	-0.267
	L_{90}	2.247	1.277	1.90	1.910	-0.925

3.3.2. Weryfikacja dokładności modelu

W rozdziałach 3.2.1 oraz 3.2.2 wykazano, że parametry mierzone eksperymentalnie oraz parametry generowane w procesie symulacji są obarczone pewnym błędem losowym. Wynika stąd, że przy porównaniu wyników eksperymentalnych (stanowiących w tym przypadku miarę odniesienia) z wynikami generowanymi przez model mogą zajść dwie sytuacje:

S1: Każda para estymatorów wartości parametrów hałasu odpowiadająca i-temu przedziałowi natężenia ruchu $\bar{\theta}_i, \tilde{\theta}_i$ została otrzymana na drodze wielokrotnie powtarzanej procedury pomiaru oraz symulacji dla tych samych warunków i porównujemy zatem wartości średnie rozkładów estymatorów. Stąd wartość średnią błędu modelu $\delta\Psi_i$ można zdefiniować:

$$\langle \delta\Psi_i \rangle = \langle \bar{\theta}_i \rangle - \langle \tilde{\theta}_i \rangle \quad (3.10)$$

gdzie:

indeks "i" oznacza daną sytuację (warunki) w ruchu na odcinku obserwacji.

S2: Porównujemy estymatory punktowe wylosowane z rozkładu estymatorów, tzn. otrzymane na drodze jednokrotnego pomiaru dla danej sytuacji w ruchu i jednokrotnej symulacji. Różnicę pomiędzy $\bar{\theta}$ oraz $\tilde{\theta}$ określa w tym przypadku zależność:

$$\delta_i(\bar{\theta}, \tilde{\theta}) = [\bar{\theta}_i \leftarrow p_i(\bar{\theta})] - [\tilde{\theta}_i \leftarrow p_i(\tilde{\theta})] \quad (3.11)$$

Różnica $\delta_i(\bar{\theta}, \tilde{\theta})$ nie może być utożsamiana z błędem modelu, gdyż jest wielkością losową i zawiera w sobie błąd $\delta_i\bar{\theta}$ oszacowania parametrów $\bar{\theta}_i$ wynikający z pomiaru oraz błąd $\delta_i\tilde{\theta}$ oszacowania parametru $\tilde{\theta}_i$ wynikający z symulacji. Sprawę dodatkowo komplikuje fakt, że błędy oszacowania $\delta\bar{\theta}$ i $\delta\tilde{\theta}$ zależą od natężenia ruchu, dla którego są wyznaczane. Wymienione czynniki skłaniałyby do przyjęcia definicji błędu modelu $\delta\Psi_i$ wyrażonej zależnością (3.10), w praktyce jednak nie jest możliwe (pomijając względy czasochłonności pomiaru) wielokrotne powtarzanie pomiaru eksperymentalnego dla danej sytuacji w ruchu drogowym przy utrzymaniu założenia o niezmienności wartości parametrów ruchu.

Zdecydowano się zatem przyjąć za podstawę oszacowania błędu modelu warunki podane w S2.

Celem sformułowania zależności na błąd modelu $\delta\Psi_i$ poczyniono następujące założenia szczegółowe:

ZS1 - $\delta\Psi_i$ jest zmienną losową o rozkładzie $p_i(\delta\Psi) \in N(\mu_{\Psi_i}, \sigma_{\Psi_i})$

ZS2 - $\delta_i(\bar{\theta}, \tilde{\theta})$ jest zmienną losową o rozkładzie $p_i[\delta(\bar{\theta}, \tilde{\theta})]$

ZS3 - Istnieją rozkłady normalne błędów pomiaru i symulacji $p_i(\delta\bar{\theta})$ oraz $p_i(\delta\tilde{\theta})$ takie, że odchylenia standardowe

$\sigma_{\bar{\theta}_i}$ i $\sigma_{\tilde{\theta}_i}$ tych rozkładów związane są z błędem oszacowania pomiaru $\Delta\bar{\theta}_i$ i symulacji $\Delta\tilde{\theta}_i$ następującymi zależnościami¹:

$$\sigma_{\bar{\theta}_i} = s_{\bar{\theta}_i} = \Delta\bar{\theta}_i / 2 \cdot t_{\alpha} \quad \text{i} \quad \sigma_{\tilde{\theta}_i} = s_{\tilde{\theta}_i} = \Delta\tilde{\theta}_i / 2 \cdot t_{\alpha} \quad (\alpha=0.01) \quad (3.12)$$

W oparciu o założenia ZS1 - ZS3 oraz zal. 3.11, a także uwzględniając niezależność zmiennych losowych $\delta\bar{\theta}$ i $\delta\tilde{\theta}$ otrzymujemy:

$$p_i[\delta(\bar{\theta}, \tilde{\theta})] \in N(\mu_{\delta_i}, \sigma_{\delta_i}) \quad (3.13a)$$

oraz:

$$p_i[\delta(\bar{\theta}, \tilde{\theta})] = p_i(\bar{\theta} - \tilde{\theta}) \quad (3.13b)$$

$$\text{gdzie: } \mu_{\delta_i} = \langle \Delta_i(\bar{\theta}, \tilde{\theta}) \rangle = \langle \bar{\theta}_i \rangle - \langle \tilde{\theta}_i \rangle \quad (3.14a)$$

$$\sigma_{\delta_i} = s(\bar{\theta}, \tilde{\theta}) = \sqrt{\sigma_{\bar{\theta}_i}^2 + \sigma_{\tilde{\theta}_i}^2 + \sigma_{\Psi_i}^2} \quad (3.14b)$$

uwzględniając w 3.14a zależność 3.10 oraz przekształcając odpowiednio 3.14b otrzymujemy:

$$\mu_{\delta_i} = \langle \delta\Psi_i \rangle \quad (3.15a)$$

$$\sigma_{\Psi_i} = \sqrt{\sigma_{\delta_i}^2 - (\sigma_{\bar{\theta}_i}^2 + \sigma_{\tilde{\theta}_i}^2)} \quad (3.15b)$$

$$p_i(\delta\Psi_i) \in N(\langle \delta\Psi_i \rangle, \sigma_{\Psi_i}) \quad (3.15c)$$

Zależności 3.15a i b, definiujące parametry rozkładu błędu modelu $\delta\Psi_i$ w oparciu o parametry rozkładu różnic między wartościami mierzonymi i uzyskanymi z symulacji, umożliwiają oszacowanie wartości tego błędu.

Jako materiał eksperymentalny wykorzystano pomiary wykonane dla 30 sytuacji w ruchu drogowym z rozdziału 3.3. oraz wyniki

¹ Prawdziwość tego założenia została sprawdzona w ramach Eksp. II.2 i II.3.

symulacji dla ostatecznie przyjętego wariantu modelu z regułą RG1p/d-Z. Przy wyliczaniu parametrów rozkładu błędu modelu (3.15) przyjęto z konieczności dodatkowe założenie upraszczające¹ o niezależności wariancji $\sigma_{\tilde{\theta}}^2$ i $\sigma_{\tilde{\theta}}^2$ rozkładów błędów od natężenia ruchu. W obliczeniach jako wariancje rozkładów błędów $p(\delta\tilde{\theta})$ i $p(\delta\tilde{\theta})$ przyjęto ważone estymatory wariancji $S_{\tilde{\theta}}^2$ i $S_{\tilde{\theta}}^2$, wyznaczone z zależności:

$$S_{\tilde{\theta}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^3 n_i S_{\tilde{\theta}_i}^2, \quad S_{\tilde{\theta}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^3 n_i S_{\tilde{\theta}_i}^2 \quad (3.16)$$

gdzie: n_i - liczba sytuacji o natężeniu ruchu Q należącym do i -tego zakresu (por. tabela 3.4 i 3.5),

$S_{\tilde{\theta}_i}, S_{\tilde{\theta}_i}$ - estymatory odchylenia standardowego rozkładów $p_i(\delta\tilde{\theta})$ i $p_i(\delta\tilde{\theta})$ odpowiadające przyjętym wartościom $\Delta\tilde{\theta}_{i,\max}$ i $\Delta\tilde{\theta}_{i,\max}$ (por. tabela 3.4 i 3.5 oraz zależność 3.12)

$$N = \sum_i n_i$$

Uwzględniając poczynione założenia upraszczające, zależności 3.15 przyjmują postać:

$$\langle \delta\Psi \rangle = \langle \Delta\Psi \rangle = \langle \tilde{\theta} \rangle - \langle \tilde{\theta} \rangle \quad (3.17a)$$

$$\sigma_{\Psi} = s_{\Psi} = \sqrt{s^2(\tilde{\theta}, \tilde{\theta}) - (S_{\tilde{\theta}}^2 + S_{\tilde{\theta}}^2)} \quad (3.17b)$$

$$p(\delta\Psi) \in N(\langle \Delta\Psi \rangle, s_{\Psi}) \quad (3.17c)$$

Dla posiadanego materiału badawczego $n_1 = 10$ ($Q > 1000$ [poj/h]), $n_2 = 15$ ($Q \in \{500, 1000\}$ [poj/h]), $n_3 = 5$ ($Q < 500$ [poj/h]).

¹ Dysponowano materiałem eksperymentalnym dla 30 sytuacji. Przyjęcie różnych rozkładów dla trzech zakresów natężeń doprowadziłoby do konieczności losowania tylko pięciu wartości z rozkładu dla przedziału $Q < 500$ poj/h.

Wartości $\langle \Delta \Psi \rangle$ oraz S_{Ψ} obliczone dla parametrów¹ ze zbioru $\{L\}$ (3.8) podano w tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Wyniki oszacowania parametrów rozkładu błędu modelu dla reguły RG1p/d-Z

parametr Θ	L_{eq}	$\langle L \rangle$	L_{10}	L_{50}	L_{90}
$\langle \Delta \Psi \rangle$ [dB(A)]	0.19	0.373	-0.394	0.123	1.91
S_{Ψ} [dB(A)]	1	1.44	1.16	1.09	3.3
$\sqrt{s_{\Theta}^2 + s_{\Theta}^2}$ [dB(A)]	0.91	1.1	0.865	1.24	1.2

Na podstawie analizy wyników podanych w tabeli 3.6 można stwierdzić, że opracowany model symulacyjny z wariantem reguły RG1p/d-Z spełnia dla parametrów L_{eq} , $\langle L \rangle$, L_{10} , L_{50} przyjęte kryterium KW (3.8). Występują natomiast rozbieżności dla poziomu quasiminimalnego L_{90} .

Rozbieżności te są wynikiem przyjęcia w obliczeniach arbitralnej, stałej wartości poziomu tła akustycznego w punkcie obserwacji, czyli poziomu zakłóceń pochodzących od innych źródeł hałasu niż rozpatrywane w modelu.

Dla małych natężeń ruchu ($Q < 500$ poj/h) poziom ten ma decydujący wpływ na wartość poziomu L_{90} wypadkowego hałasu w punkcie obserwacji.

¹ Oszacowanie parametrów TNI i L_{NP} obarczone jest dużym błędem, wynikającym z błędu oszacowania poziomu L_{90} w procesie symulacji.

4. Podsumowanie

4.1. Uwagi dotyczące spełnienia celu pracy oraz podstawowych założeń

Zamieszczone w pracy wyniki rozważań teoretycznych oraz badań eksperymentalnych wskazują, że założone w rozdziale 1.4.2 cele pracy zostały osiągnięte:

- Podano ściśle sformułowanie modelu symulacyjnego prognozującego zbiór parametrów hałasów (Cel 1).

- Reguły modelu pozwalają uwzględnić probabilistyczny charakter wielkości opisujących ruch na odcinku drogi, a także deterministyczne zależności na rozchodzenie się fali akustycznej w półprzestrzeni ograniczonej płaszczyzną odbijającą.

- W trakcie badań empirycznych dla typowych w kraju warunków ruchu drogowego zmierzono i podano dyskretny rozkład klasyfikacji parku pojazdów, rozkłady prędkości ruchu pojazdów należących do poszczególnych klas oraz rozkłady poziomu hałasu generowanego w punkcie obserwacji przez pojazdy danej klasy, poruszające się z prędkościami należącymi do pewnego przedziału prędkości (Cel 2).

- Przeprowadzona procedura weryfikacji modelu, przy przyjętych kryteriach, pozwoliła wybrać optymalny - w rozważanym zbiorze wariantów - model symulacyjny oraz oszacować błąd dokładności modelu dla generowanych parametrów hałasu.

- Materiałem eksperymentalnym przy weryfikacji były sygnały hałasów komunikacyjnych nagrane dla 30 różnorodnych sytuacji w ruchu na odcinku drogi, spełniono zatem statystyczne kryterium wiarygodności (Cel 3).

- Model symulacyjny zrealizowano w postaci programu PGH IV napisanego w języku BASIC na minikomputer 7504 B&K/Varian¹.

Podstawowe założenia pracy (rozdział 1.4.3) dotyczyły w większości przyjętych ograniczeń w sformułowaniu modelu i wykorzystano je w toku rozważań i eksperymentów przeprowadzonych w pracy. Celowe jest jednak ustosunkowanie się do założeń dotyczących parametrów wejściowych modelu oraz możliwości rozszerzenia modelu w kierunku uwzględnienia wpływu otoczenia na wypadkowy poziom hałasu w punkcie obserwacji.

¹ Program PGH IV dostępny jest u autora pracy w Środowiskowym Laboratorium Badawczym Hałasów i Wibracji Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, ul. B. Prusa 53/55.

W odniesieniu do parametrów wejściowych postulowano, aby były zbliżone do parametrów stosowanych przy projektowaniu dróg i arterii komunikacyjnych.

Założenie to zostało spełnione, gdyż parametry wejściowe modelu, takie jak liczba pasów ruchu, średnie natężenie ruchu, skład procentowy pojazdów w strumieniu, są także wielkościami wykorzystywanymi przy projektowaniu arterii komunikacyjnych. Pewne trudności mogą wystąpić przy określaniu parametrów rozkładu prędkości ruchu pojazdów różnych klas, gdyż w praktyce stosuje się jedną wielkość, określającą średnią prędkość ruchu na odcinku międzywęzłowym, tzw. prędkość podróżną [86].

W cytowanej w pracy literaturze dotyczącej projektowania dróg nie znaleziono konkretnych danych pozwalających na oszacowanie parametrów rozkładu prędkości ruchu z uwzględnieniem podziału parku pojazdów na klasy.

W związku z tym, na podstawie wyników pomiarów parametrów ruchu uzyskanych w Eksp. II.4 (rozdział 2.2.4.4.) oraz przy weryfikacji modelu (rozdział 3.3.1) oszacowano typowe wartości różnic między średnimi prędkościami ruchu $\langle V_k \rangle$ pojazdów należących do przyjętych trzech klas w zależności od typu arterii, oraz typowe wartości odchylen standardowych $\sigma_{V,k}$ rozkładów $p_k(V)$ w zależności od średnich prędkości ruchu. Wyniki oszacowania podano w tabeli 4.1 dla arbitralnie przyjętych wartości średniej prędkości ruchu pojazdów klasy lekkiej.

Założenie dotyczące możliwości rozszerzenia modelu omówiono w następnym rozdziale.

Tabela 4.1. Wyniki oszacowania relacji między średnimi prędkościami ruchu $\langle V_k \rangle$ pojazdów trzech klas w zależności od typu arterii, oraz wyniki oszacowania odchylenia standardowego $\sigma_{V,k}$ rozkładu prędkości $p_k(V)$

		klasa poj.k	drogi miejskie				szosy				
$\langle V_k \rangle$	[km/h]	lekka	40	50	60	70	50	60	70	80	90
		średnia	40	50	55	60	50	55	60	70	80
		ciężka	35	45	45	50	50	50	55	65	70
$\sigma_{V,k}$	[km/h]	lekka	9		10		13		15		
		średnia	8		9		8		9		
		ciężka	8		9		10		11		

4.2: Możliwości rozszerzenia modelu

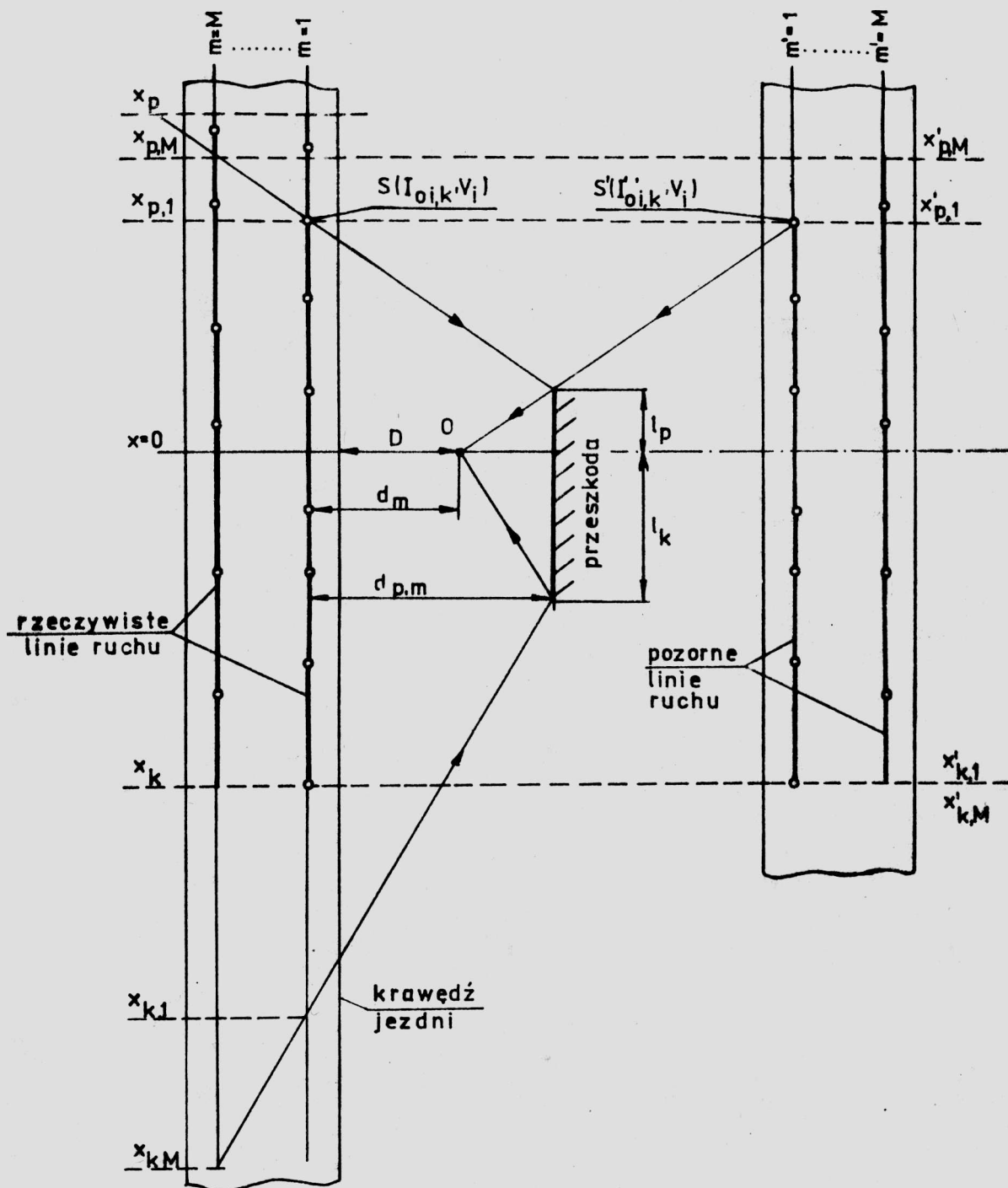
4.2.1. Wstęp

Podany w pracy model symuluje rzeczywisty ruch na prostym odcinku drogi, to znaczy symuluje poruszanie się pojazdów różnych klas, z różnymi prędkościami wzdłuż wydzielonych linii obserwowanego odcinka drogi, co umożliwia, w dalszym etapie, uwzględnienie w szerokim zakresie wpływu warunków otoczenia na wypadkowy poziom hałasu w dowolnym punkcie obserwacji, łącznie z przestrzennym rozkładem elementów struktury urbanistycznej. Istnieją oczywiście ograniczenia w taki rozszerzeniu modelu, aby można było prognozować z żądaną dokładnością hałas w dowolnym punkcie dla dowolnego otoczenia i dowolnego układu komunikacyjnego.

Pierwsza grupa czynników ograniczających wynika z trudności w sformułowaniu opisu ujmującego wszystkie zjawiska związane z propagacją fali akustycznej w rzeczywistych warunkach dla dowolnej konfiguracji źródła i elementów otoczenia oraz w wyznaczeniu wartości parametrów występujących w tych zależnościach, takich jak np. współczynnik odbicia od fasad budynków, współczynnik pochłaniania niejednorodnego gruntu itp., dla szerokiego zakresu typowych sytuacji [41,49].

Druga grupa czynników związana jest z przyjętą strukturą modelu, która umożliwia prognozowanie skończonego i ściśle określonego zbioru parametrów opisujących hałas $\{L\}$ (3.8) dla swobodnego strumienia pojazdów, poruszającego się po prostej drodze. Nie jest zatem możliwe prognozowanie hałasu w otoczeniu skrzyżowań, rond, estakad lub wiaduktów oraz nie jest możliwe generowanie parametrów opisujących fizyczną strukturę sygnału, jak np. rozkład energii w pasmach częstotliwości.

Powyższe ograniczenia można wyeliminować. Ogólna koncepcja zaproponowanego modelu umożliwia symulację ruchu po dowolnej krzywej opisanej analitycznie, dla dowolnego, opisanego zależnością sposobu poruszania się pojazdów. Oczywiście trzeba zmienić wtedy reguły organizujące ruch na odcinku obserwacji oraz wprowadzić odpowiednie modyfikacje reguły generalnej RG1. Możliwe jest również generowanie rozkładu poziomów hałasu w wybranych pasmach częstotliwości przez wprowadzenie rekurencyjnej reguły wyliczania parametrów hałasu dla kolejnych pasm.



Rys.4.1 Szkic sytuacji na drodze z uwzględnieniem przeszkody odbijającej umieszczonej po jednej stronie jezdni.

S - rzeczywiste źródło hałasu, S' - pozorne źródło hałasu

x_k, x_p - krańce rzeczywistego odcinka obserwacji,

$x'_{p,m}, x'_{k,m}$ - krańce pozornej m -tej linii ruchu.

Można więc sformułować następujące wnioski:

- Podana w pracy koncepcja modelu symulacyjnego oparta na wydzielonych zbiorach reguł generatywnych umożliwia elastyczne rozszerzenie modelu zarówno dla opisywanych sytuacji w ruchu, jak i prognozowanych parametrów hałasu.

- Uwzględnienie wpływu otoczenia wymaga modyfikacji wyłącznie reguły generalnej RG2 (aczkolwiek modyfikacje te mogą być bardzo złożone i rozbudowane). Reguła RG2 jest więc ogniwem wiążącym model źródła hałasu z modelem jego otoczenia.

Celem zobrazowania powyższego stwierdzenia rozważono w następnym rozdziale 4.2.2. prosty przykład uwzględnienia przeszkody odbijającej umieszczonej w odległości D_p od krawędzi jezdni, przy czym między krawędzią jezdni a punktem obserwacji znajduje się pas trawy o szerokości H . Podano dla niego zmodyfikowaną postać reguły RG2 oraz eksperymentalną weryfikację prognozowanych parametrów hałasu.

4.2.2. Przykład rozszerzenia modelu

Na rys. 4.1 pokazano szkic sytuacji w ruchu na odcinku drogi oraz rozważane elementy otoczenia, mające wpływ na poziom hałasu w punkcie obserwacji O .

Przy modyfikacji reguły RG2 wpływ powierzchni odbijającej uwzględniono metodą pozornych linii ruchu punktowych źródeł hałasu (rys. 4.1) [51].

Wpływ pasa trawy uwzględniono przez wprowadzenie współczynnika tłumienia γ [42, 85, 93].

Przy przyjętym założeniu Z11 (rozdział 2.1.2) otrzymano następującą postać zmodyfikowanej reguły generalnej RG2:

$$RG2-P: \bigwedge_{n \in \{1, N\}} I_{m,i}(t_n) = \frac{I_{01,k} R}{d_m^2 + x_1^2(t_n)} \exp \left[-\gamma H \sqrt{1 + (x_1(t_n)/d_m)^2} \right] \quad (4.1)$$

gdzie: R - współczynnik odbicia fali akustycznej od przegrody

γ - współczynnik tłumienia przez grunt

H - szerokość pasa zieleni

(pozostałe oznaczenia jak we wzorze 2.2)

Parametry zmodyfikowanej reguły RG2-P - R , γ , H - stano-

wią dodatkowe parametry wejściowe modelu¹.

Odległość pozornej m-tej linii ruchu d_m dla sytuacji, w której punkt obserwacji znajduje się po tej samej stronie jezdni co przeszkoda, określona jest zależnością:

$$d'_m = 2 d_{p,m} - d_m \quad (4.2)$$

gdzie: $d_{p,m}$ - prostopadła odległość przeszkody od rzeczywistej m-tej linii ruchu

d_m - prostopadła odległość punktu obserwacji od m-tej linii

Krańce odcinka obserwacji na pozornej linii ruchu określone są następującą zależnością:

$$x'_{p,m} = \min(x_p, x_{p,m}) \quad (4.3a)$$

$$x'_{k,m} = \min(x_k, x_{k,m}) \quad (4.3b)$$

gdzie: x_p i x_k - odpowiednio początkowy i końcowy kraniec rzeczywistego odcinka obserwacji (zal. (3.8))

$x_{p,m}$ i $x_{k,m}$ - najdalsze położenie (odp. po prawej i lewej stronie) punktowego źródła hałasu na rzeczywistej m-tej linii ruchu, takie że fala akustyczna generowana przez źródło znajdujące się w tym punkcie, po odbiciu od przeszkody dotrze do punktu obserwacji. Stąd:

$$x_{p,m} = [d_{p,m} / (d_{p,m} - d_m)] \cdot l_p \quad (4.4b)$$

$$x_{k,m} = [d_{p,m} / (d_{p,m} - d_m)] \cdot l_k \quad (4.4.b)$$

gdzie: l_p , l_k - prostopadłe odległości prostopadłego rzutu punktu obserwacji na płaszczyznę czołową przeszkody od krańców przeszkody (rys. 4.1)

$d_{p,m}$, d_m - jak we wzorze 4.2

Pomiary eksperymentalne oraz procedurę symulacji² wykonano dla czterech punktów obserwacji rozłożonych na odcinku prostopad-

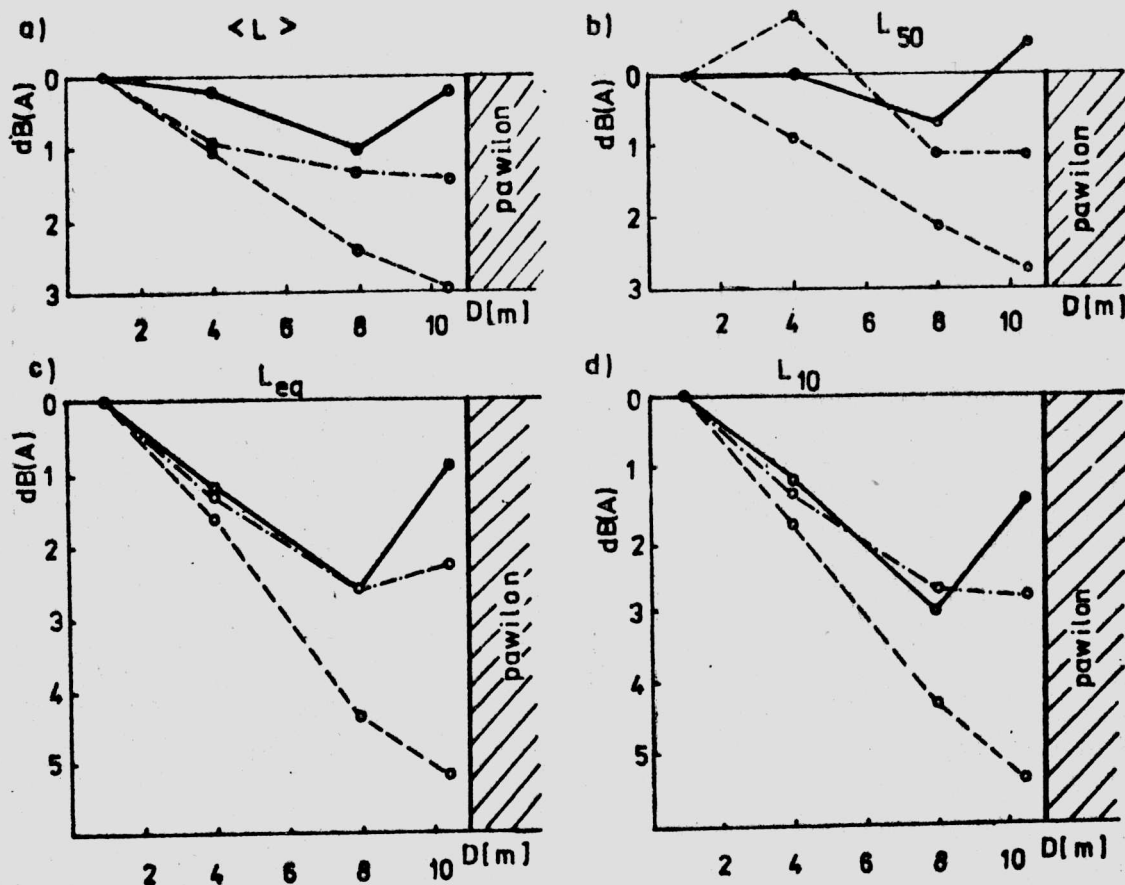
¹ Dla M-pasowej jezdni przy uwzględnieniu w modelu wpływu odbicia od jednostronnej zabudowy liczba linii ruchu wynosi 2M.

² W obliczeniach przyjęto $\gamma = 0.0229 \text{ dB/m}$ [42,93].

łym do krawędzi jezdni i przeszkody w odległościach: 1m, 4m, 8 m, 10 m od krawędzi jezdni. Odległość pawilonu od krawędzi czteropasmowej jezdni z wydzielonym torowiskiem wynosiła 11 m.

Wyniki pomiarów i obliczeń w postaci wykresów zależności $\Delta\theta = \theta(D) - \theta(1)$ pokazano na rys. 4.2. Na rysunku tym umieszczono również wykresy $\Delta\theta = f(D)$ obliczone dla propagacji w przestrzeni otwartej (reguła RG2 bez modyfikacji) (zał 2.2.).

Analiza wyników wskazuje, że model ze zmodyfikowaną regułą RG2 znacznie lepiej prognozuje parametry hałasu dla rozważanej sytuacji niż model dla propagacji w przestrzeni otwartej. Trudno pokusić się jednak o ekstrapolację uzyskanych wyników na dowolną sytuację urbanistyczną bez odpowiednio wiarygodnej statystycznie weryfikacji przyjętej postaci reguły RG2-P.



Rys. 4.2. Wyniki pomiarów i obliczeń zmniejszania parametrów charakteryzujących hałas w zależności od odległości D od krawędzi jezdni. - a) - poziom średni $\langle L \rangle$; b) - mediana L_{50} ; c) - poziom równoważny L_{eq} ; d) - poziom quasimaksymalny L_{10} ; pomiar: —•—; symulacja dla propagacji w przestrzeni otwartej (RG2(2.2)): - - - - -; symulacja dla zmodyfikowanej reguły RG2 (4.1): - · - · - ·

4.3. Uwagi końcowe

1. Przedstawiony w pracy model symulacyjny prognozujący parametry hałasu dla swobodnego strumienia pojazdów nie stanowi wprawdzie kompleksowego rozwiązania dla pełnej klasy sytuacji występujących w układach komunikacyjnych, ale w opinii autora jest istotnym dokonaniem w zakresie prognozowania hałasów komunikacyjnych.

Za swój oryginalny wkład autor uważa zastosowanie generatywnego podejścia do formułowania tego typu modelu, dokonania ścisłego podziału reguł modelu pozwalającego na modularną modyfikację modelu, tzn. na modyfikowanie konkretnego zestawu reguł przy zadanym zespole czynników koniecznych do uwzględnienia w modelu.

2. Przy formułowaniu modelu zbadano kilka wariantów podstawowej reguły generalnej RG1, wiążącej poziom natężenia hałasu generowanego przez pojedynczy pojazd poruszający się w swobodnym strumieniu ruchu z jego prędkością oraz klasą. Opierając się na badaniach eksperymentalnych ustalono ostateczną postać analityczną reguły RG1 oraz wyznaczono występujące w niej parametry dla typowych warunków krajowych.

3. W trakcie rozważania problemów, nakreślonych tezą pracy, rozwiązano szereg ubocznych zagadnień cząstkowych istotnych dla przyjętej w pracy metodyki eksperymentalnej i mających cechy oryginalnego dorobku naukowego. Należy tu wymienić:

- opracowanie metod analizy błędów pomiaru, symulacji oraz błędu modelu, z wyliczeniem konkretnych oszacowań tych błędów dla typowych w kraju warunków w ruchu drogowym,

- zmierzenie i podanie typów oraz parametrów rozkładu wielkości opisujących ruch na odcinku obserwacji. Powyższe dane mogą być stosowane nie tylko w omawianym modelu, ale również w innych badaniach dotyczących oceny hałasu dla krajowych układów komunikacyjnych.

Zaproponowany w pracy model, mimo swojego ograniczonego charakteru, może stanowić narzędzie do praktycznych zastosowań, w szczególności przy projektowaniu przelotowych arterii miejskich i międzymiastowych.

Spis literatury

1. Griffiths I.D., Langdon F.J.: Subjective response to road traffic noise. J. Sound Vib. (1968) 8 (1), 16-32.
2. Schultz T.I.: Community noise ratings. Appl. Acoustics, Suppl. No 1, Applied Science Publishers Ltd 1972.
3. Langdon F.J.: Noise nuisance caused by road traffic in residential areas part I, part II. J. Sound Vib. (1976) 47(2), 243-263, 265-282.
4. Gambart R. at all: Study of annoyance by traffic noise in Leuven (Belgium). App. Acoustics (1976) (9), 193-203.
5. Langdon F.J., Buller I.B.: Road traffic and disturbance to sleep. J. Sound Vib. (1977) 50 (1), 13-28.
6. Rice C.G.: Development of cumulative noise measure for the prediction of general annoyance in an average population. J. Sound Vib. (1977) 52(3), 345-364.
7. Hall F.L., Taylor S.M.: Predicting community response to road traffic noise. J. Sound Vib. (1977) 52 (3), 387-399.
8. Johnson D.R., Saunders E.G.: The evaluation of noise from freely flowing road traffic. J. Sound Vib. (1968) 7(2), 287-309.
9. Rathe E.J.: Note on two common problems of sound propagation. J. Sound Vib. (1969) 10(3), 472-479.
10. Kurze U.J.: Statistic of road traffic noise. J. Sound Vib. (1971) 18 (2), 171-195.
11. Kurze U.J.: Noise from complex road traffic. J. Sound Vib. (1971) 19 (2), 167-177.
12. Sadowski J.: Akustyka w urbanistyce, architekturze i budownictwie. Warszawa 1971 (Arkady) rozdział 5 i 6.
13. Scholes W., Sargent J.: Designing against noise from road traffic. Appl. Acoustics (1971) vol. 4, 203-234.
14. Shaw E., Olson N.: Theory of steady-state urban noise from ideal homogeneous city. JASA, 51 (1972), 1761-1793.
15. Blitz J.: Prediction of L_{10} on urban main road. Acustica (1973) vol. 29, 210-218.
16. Cevallos De J.F. at all: A project of urban traffic noise control. Acustica (1973) vol. 29, 219-225.
17. Yeow K.W.: A stochastic model of the noise field emitted from traffic in steady flow. J. Sound Vib. (1974) 32 (2), 227-239.

18. Takagi K. at all: Investigation on road traffic noise based on an exponentially distributed vehicles model - single line flow of vehicles with same acoustic power. J. Sound Vib. (1974) 36 (3), 417-431.
19. Blitz J.: Traffic noise measurements on urban main roads with gradients. J. Sound Vib. (1974), 37 (3), 311-319.
20. Blandamura F., Spagnolo R.: A mathematical model for predicting the noise of freely flowing traffic. Acustica (1974) 30 (4), 236-240.
21. Alexandre at all: Road traffic noise. London 1945 (Appl. Science at all Publishers Ltd.).
22. Delany M.E. at all: The prediction of noise levels L_{10} due to road traffic. J. Sound Vib. (1976) 48 (3), 305-325.
23. Grabek J., Kucharski R.: Obliczeniowe metody określania poziomów hałasu zewnętrznego. Prace Instytutu Kształtowania Środowiska, Warszawa 1976.
24. Gilbert D.: Noise from traffic (interrupted flow). J. Sound Vib. (1977) 51 (2), 171-181.
25. Burgess M.A.: Noise prediction for urban traffic conditions - related to measurements in the Sydney Metropolitan Area. Appl. Acoustics (1977) (10), 1-7.
26. Ohta M. at all: A statistical theory for road traffic noise based on the composition of component response waves and its experimental confirmation. J. Sound Vib. (1977) 52 (4), 587-601.
27. Yeow K.W. at all: Method of predicting L_{eq} created by urban traffic. J. Sound Vib. (1977) 53 (1), 103-109.
28. Wesler J.E.: Highway traffic noise prediction: A State-of-the-Art-Review. J. Sound Vib. 1977 (February), 12-16.
29. Makarewicz R.: Metoda wyznaczania poziomu równowaznego L_{eq} . Archiwum Akustyki 12, 2 (1977), 101-112.
30. Rudno-Rudzińska B. i inni: Matematyczny model hałasu ruchu drogowego. Materiały XXIV Otwartego Seminarium z Akustyki (1977).
31. Mohsen E.A., Oldham D.J.: Traffic noise reduction due to the screening effect of balconies on building facade. Appl. Acoustics (1977) (10), 243-257.
32. Kossakowski M.: Metoda szczegółowego obliczania hałasu drogowego. Problemy Projektowania Dróg i Mostów (1978), 14-25.

33. Rudno-Rudzińska B., Zalewski J.: Prediction of community noise using the digital simulation method. Proceedings FASE 78 Warszawa 1978 (III-31) 147-150.
34. Buna B., Werebl L.: The effect of vehicle categories and speeds on noise level of urban expressways. Proceedings FASE 78, (1978) III-30, 141-145.
35. Makarewicz R., Kerber G.: Metoda przewidywania wartości poziomu ekwiwalentnego w strukturze urbanistycznej. Archiwum Akustyki 13 (4) (1978), 261-278.
36. Makarewicz R., Jarzęcki J.: Weryfikacja eksperymentalna metody przewidywania poziomu równoważnego w pobliżu dróg o ruchu ciągłym. Archiwum Akustyki 15 (2) (1980), 159-170.
37. Hafidh S. et al.: Noise from interrupted traffic flows. Proceedings Inter-Noise, Warszawa 1979 (2), 539-542.
38. Hothersall D.C., Jones R.R.K.: Computer simulation of road traffic in the region of roundabouts. Proceedings Inter-Noise, Warszawa (1979) (2), 553-556.
39. Wang Nui: A noise conoid model for traffic noise simulation. Proceedings Inter-Noise, Warszawa (1979) (2), 495-498.
40. Diggory I.S., Oakes B.: Computer simulation model for prediction of traffic noise. Appl. Acoustics (1980) 13 (1), 19-31.
41. Aylor D.: Noise reduction by vegetation and ground. JASA (1972) 51 (1), 197-205.
42. Blumenfeld D.E., Weiss G.H.: Attenuation effects in the propagation of traffic noise. Transport Res. (1975) 9 (2-B), 103-106.
43. Donato R.J.: Propagation of spherical wave near a plane boundary with complex impedance, JASA (1976) 60 (1), 34-40.
44. Embleton T.P. et al.: Outdoor sound propagation in the atmosphere. JASA (1976) 59 (2), 267-279.
45. Piercy J.E., Embleton T.F.: Review of noise propagation in the atmosphere. JASA (1977) 61 (6), 1403-1418.
46. Makarewicz R.: The relationship between the noise emitted by a single source and the distance in open space. Acoustics Letters (1979) 3 (6).
47. Makarewicz R.: Intensity of sound field generated by moving source in the semi-space with a stratified medium. Acustica (1980) 45 (2) 115-121.
48. Rathe E.J.: Sound reduction by barriers. J. Sound Vib. (1969) 10 (3).

49. Jonasson H.G.: Sound reduction by barriers on the ground. J. Sound Vib. (1972) 22 (1), 113-126.
50. Jonasson H.G.: A theory of traffic noise propagation with application to L_{eq} . J. Sound Vib. (1973) 30 (3), 289-303.
51. Lyon R.H.: Role of multiple reflections and reverberation in urban noise propagation. JASA (1974) 55 (3), 493-503.
52. Maekawa Z.: Environmental sound propagation. The Eight International Congress on Acoustics. London (1974).
53. Clayden A.D. at all: Modelling traffic noise mathematically. Appl. Acoustics (1975) (8), 1-12.
54. Maekawa Z.: Noise shielding on highway. Proceedings of Noise Control, Warszawa (1976), 55-64.
55. Yeow K.W.: Decay of sound levels with distance from a steady source observed in a built-up area. J. Sound Vib. (1977) 52 (1), 151-154.
56. Bullen R., Fricke F.: Sound propagation at street intersection in an urban environment. J. Sound Vib. (1977) 54 (1), 123-129.
57. Kurra S.: A computer model for predicting the sound distribution behind the buildings which are to be used as barriers of traffic noise. Proceedings of Inter-Noise, Warszawa (1979) (2), 543-548.
58. Beracha R.J.: A simple method for prediction the traffic noise reduction by finite barriers. Acustica (1980) 44 (1) 23-26.
59. Jones H.W. at all: An experimental and theoretical study of the modelling of road traffic noise and its transmission in the urban environment. Appl. Acoustics (1980) 13 (4), 251-266.
60. Priède T.: Noise and vibration problems in commercial vehicles. J. Sound Vib. (1967) 5 (1), 129-154.
61. Rathé E.J. at all: Survey of the exterior noise of some passenger cars. J. Sound Vib. (1973) 29 (4), 483-493.
62. Raff J.A., Perry R.D.H.: A review of vehicle noise studies cartied out at the Institute of Sound and Vibration Research with a reference to some recent research on petrol engine noise. J. Sound Vib. (1973) 28 (3), 433-470.
63. Waters P.E.: Commercial road vehicle noise. J. Sound Vib. (1974) 35 (2), 155-222.

64. Miazga J.: Badanie hałasów ruchu drogowego. Opracowanie kryteriów oceny i metody badania poziomu hałasu zewnętrznego pojazdów samochodowych będących w użytkowaniu. Prace Instytutu Transportu Samochodowego, nr 1838/ZB/4, Warszawa 1974.
65. Stephenson R.J., Vulkan G.H.: Traffic noise. J. Sound Vib. (1968) 7 (2), 247-262.
66. Olson N.: Survey of motor vehicle noise. JASA (1972), 52 (5), 1291-1306.
67. Lewis P.T.: The noise generated by single vehicles in freely flowing traffic. J. Sound Vib. (1973) 30 (2), 191-206.
68. Hogan C.M.: Analysis of highway noise. Water, Air and Soil Pollution. 2 (1973), 387-392.
69. Lewis P.T.: The noise generated by single vehicle in freely flowing traffic - some further comments. J. Sound Vib. (1977) 55 (3), 472-473.
70. Ko N.W.M.: Noise of individual vehicles in a high-rise city. J. Sound Vib. (1977) 55 (1), 39-48.
71. Nelson P.M.: Classifying road vehicles for the predicting of traffic noise. 9-th International Congress on Acoustics. Madrid (1977) (1-E), 166-170.
72. Bodsworth B., Lawrence A.: The contribution of heavy vehicles to urban traffic noise. Appl. Acoustics (1978) (11) 57-65.
73. Rudzińska B. i inni: Hałas pojedynczego pojazdu poruszającego się w strumieniu ruchu. Materiały XXVII Otwartego Seminarium z Akustyki, Warszawa-Puławy (1980) (2), 4-115.
74. Miazga J.: Pojazdy samochodowe i jednośladowe jako źródło zakłóceń akustycznych środowiska. Materiały Sympozjum Naukowo Technicznego na temat "Ochrona środowiska przed hałasem zewnętrznym", Warszawa (1980).
75. Nelson P.M.: The combination of noise from separate time varying sources. Appl. Acoustics (1973) (6), 1-21.
76. Kessler P.M., Gottlieb P.: Method to convolve sound-level distributions for prediction of community sound levels. JASA (1976) 60 (5), 1108-1110.
77. Miller A.J.: A queueing model for road traffic flow. J. Roy. Stat. Soc. B 1961, vol. 23, No 1, 64-90.

78. Weiss G., Herman R.: Statistical properties of low-density traffic. Quart. of Appl. Math. (1962) 20 (2), 121-130.
79. Gerlough D.L., Wagner F.A.: Simulation of the network. Proceedings of Highway Conference on the Future of Research and Development in Traffic Surveillance and Control. Washington (1964), 152-162.
80. Levy S.L.: Simulation of the freeway. Proceedings of Highway Conference on the Future of Research and Development in Traffic Surveillance and Control. Washington (1964), 166-170.
81. Varol Y.L. at all: Applying simulation to highway intersection design. Simulation (1977) 28 (4), 97-105.
82. Breiman L.: The poisson tendency in traffic distribution. Annals of Math. Statistics (1963) 34 (1-2), 308-311.
83. Thedéen T.: A note on the Poisson tendency in traffic distribution. The Annals of Math. Statistics (1964) 35 (4) 1823-1824.
84. Blumenfeld D.E., Weiss G.H.: Effects of Headway distributions on second order properties of traffic noise. J. Sound Vib. (1975) 41 (1), 93-102.
85. Hoel D.G., Weiss G.H.: Properties of noise emitted by vehicular queues. Transp. Res. 1977 (1), 39-44.
86. Suchorzewski W.: Wybrane zagadnienia inżynierii ruchu. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1976.
87. Smirnow W., Dunin-Barkowski I.W.: Kurs rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. PWN Warszawa (1973).
88. Gręń J.: Statystyka matematyczna, Modele i zadania, PWN, Warszawa 1976.
89. Oktaba W.: Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalnictwa. PWN Warszawa (1974).
90. Pawłowski Z.: Statystyka matematyczna. PWN Warszawa (1976).
91. Bendat J.S., Piersol A.G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. PWN Warszawa (1976).
92. Fisk D.J.: A statistical sampling in community noise measurement. J. Sound Vib. (1973) 30 (2), 221-236.
93. Blumenfeld D.E. at all: Sampling errors in the measurement of traffic noise with gamma headway distribution. J. Sound Vib. (1977) 53 (1), 111-116.

94. Scholes W.E., Vulkan G.H.: A note on the objective measurement of road traffic noise. Appl. Acoustics (2) (1969), 185-187.
- Harland D.G.: Noise research and the Road Research Laboratory. Traffic Engineering Control, 1970 (July), 122-125.
- Cheeseman M., Nelson P.M.: A data logging system for the measurement of road traffic noise. Transport and Road Research Laboratory Report LR 479 (1972).
97. Foreman J.E.K., Emmerson M.A. at all: Noise Level/Attitudinal Surveys of London Woodstock, Ontario. J. Sound Vib. (December) (1974), 16-22.
98. Safeer H.B., at all: Errors due to sampling in community noise level distributions. J. Sound Vib. (1972) 24 (3), 365-376.
99. Safeer H.B.: Community noise level - a statistical phenomenon. J. Sound Vib. (1973) 26 (4), 483-502.
100. Rudno-Rudzińska B. i inni: Badania dokładności pomiaru parametrów rozkładu hałasu komunikacyjnego metodą próbkowania. Materiały XXIII Otwartego Seminarium z Akustyki, Wisła (1976).
101. Bordone-Sacerdote C., Sacerdote G.G.: Sampling problem and traffic noise. Acustica (1977) 37 (3), 203-205.
102. Bradley J.S. at all: Effect of skewness and standard deviation on sampling errors. Appl. Acoustics (1979) 12 (5), 387-410.
103. Słupecki J. i inni: Logika i teoria mnogości. PWN Warszawa (1978).
104. Polska Norma - PN-70/B-02151. Akustyka budowlana. Ochrona przeciwdźwiękowa pomieszczeń,
105. Ustawa sejmowa O ochronie i kształtowaniu środowiska z dn. 31.01.1980 r. Dz. Ustaw nr 3 z dn. 11.03.1980 r.
106. Acoustic Measurements According to Standards and Recommendations, Bruel & Kjaer (1978).



SUMMARY

The paper presents a simulation model predicting the set of parameters which characterize noise generated by freely flowing traffic. Basing on a generative method the structure and general rules were formulated. These assumptions (rules) make allowances for a probabilistic character of the quantities describing traffic on road section as well as for deterministic relationships which describe the propagation of acoustic wave in semi-sphere limited with reflecting surface. The structure of the model makes its modular modification possible i.e. the modification of particular set of rules a given set of factors (conditions) which must be allowed for in the model.

On the basis of experimental studies an analytic formulation of the general rule which relates noise level generated by a vehicle travelling in a freely flowing traffic to its speed and class has been presented. Parameters operating in the rule were determined and a discrete distribution of vehicle classification was described. Velocity distributions of vehicles belonging to different classes were presented.

The method of analyzing measuring error and the error of noise parameter simulation were developed and the values of error estimations for typical, domestic traffic conditions were given.

Criterion of the model verification was formulated and verification procedure was performed for 30 different situations in traffic. An optimum modification of the model was selected and the model accuracy error was estimated.