

POLITECHNIKA KRAKOWSKA  
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ  
Instytut Mechaniki Budowli

**Mgr inż. Janusz Kogut**

**ANALIZA SPEKTRUM ODPOWIEDZI  
DRGAŃ DROGOWYCH**

Rozprawa doktorska

**Promotor:**  
**prof. dr hab. inż. Janusz Kawecki**

KRAKÓW 1999



*Niniejszym chciałbym złożyć  
panu prof. dr hab. inż. Januszowi Kaweckiemu  
serdeczne podziękowanie za trud, pomoc oraz  
wnikliwie uwagi i cierpliwość wykazaną  
w trakcie pisania niniejszej rozprawy*



**Spis treści**

<b>1</b>	<b>Wstęp</b> .....	<b>5</b>
1.1	Przedmiot pracy.....	5
1.2	Cel i zakres pracy.....	6
<b>2</b>	<b>Spektrum odpowiedzi i jego zastosowanie do wyznaczania sił bezwładności</b> .....	<b>8</b>
2.1	Ogólna charakterystyka metody spektrum odpowiedzi.....	8
2.2	Spektra odpowiedzi wstrząsów sejsmicznych.....	11
2.3	Spektra odpowiedzi wstrząsów górniczych.....	14
2.4	Spektra odpowiedzi drgań komunikacyjnych.....	15
<b>3</b>	<b>Wybór parametrów ruchowo-drogowych istotnie wpływających na drgania wywołane przejazdem pojazdów kołowych</b> .....	<b>18</b>
3.1	Przegląd wybranych wyników badań.....	18
3.2	Wstępne badania własne i ich wyniki.....	19
3.2.1	Cel badań wstępnych.....	19
3.2.2	Charakterystyka metodyki pomiarowo-interpretacyjnej.....	19
3.2.3	Ogólna prezentacja i ocena wyników badań wstępnych.....	21
3.3	Zestawienie najważniejszych czynników mających wpływ na intensywność generowanych drgań drogowych.....	25
<b>4</b>	<b>Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (SSN)</b> .....	<b>27</b>
4.1	SSN atrakcyjnym narzędziem współczesnego badacza.....	27
4.2	SSN jako narzędzie przydatne w kształtowaniu modeli.....	27
4.2.1	Podstawy biologiczne.....	27
4.2.2	Model sztucznego neuronu.....	27
4.2.3	Budowa SSN i proces ich nauczania.....	31
4.3	SSN w układach dynamicznych - wybrane aplikacje.....	34
4.4	Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w rozwiązywaniu problemów inżynierii drogowej.....	40
<b>5</b>	<b>Konstruowanie modelu umożliwiającego wyznaczenie spektrum odpowiedzi drgań drogowych przy założonych warunkach ruchowo-drogowych</b> .....	<b>44</b>
5.1	Badania dynamiczne źródłem informacji niezbędnych w procesie konstruowania modelu.....	44
	5.2 Opracowanie numeryczne wyników badań doświadczalnych.....	49
5.3	Kształtowanie architektury oraz uczenie i testowanie SSN.....	58
5.3.1	SSN #1.....	58
5.3.2	SSN #2.....	61
5.3.3	SSN #3.....	63
5.3.4	SSN #4.....	66
5.3.5	SSN #5, #6 i #7.....	67
<b>6</b>	<b>Analiza wpływu parametrów ruchowo-drogowych na spektrum odpowiedzi drgań drogowych</b> .....	<b>74</b>
	6.1 Wykorzystanie w analizie SSN uczonej na danych doświadczalnych.....	74

6.2	Wpływ parametrów związanych ze źródłem drgań na przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi.....	74
6.3	Analiza wpływu czynników związanych z drogą propagacji drgań.....	94
6.4	Analiza wpływu czynników związanych z odbiorem drgań przez budowlę..	107
<b>7</b>	<b>Możliwości wykorzystania modelu w projektowaniu i diagnostyce budowli poddanych działaniu drgań komunikacyjnych.....</b>	<b>113</b>
<b>8</b>	<b>Wnioski.....</b>	<b>116</b>
<b>9</b>	<b>Kierunki dalszych badań.....</b>	<b>118</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>119</b>

## 1 Wstęp

### 1.1 Przedmiot pracy

Wzrastający ruch drogowy może być przyczyną różnych niepożądanych zjawisk w otoczeniu drogi. Oprócz takich efektów jak wzrost emisji spalin oraz poziomu hałasu generuje on również drgania podłoża. Są one przekazywane na obiekty budowlane zlokalizowane w pobliżu jezdni. Drgania przekazywane z podłoża na budowlę stanowią wymuszenie kinematyczne tej budowli. Wywołując ruch masy budowli generują one dodatkowe siły działające na budowlę zwane siłami bezwładności. Wartości tych sił można wyznaczyć analitycznie albo doświadczalnie. Ten drugi sposób można zastosować wówczas, gdy budowla została wykonana i występuje źródło drgań (odbywa się przejazd pojazdów po drodze). W pozostałych sytuacjach (tzn. budowle zrealizowano ale ruch drogowy jest w fazie projektowania; budowla jest w fazie projektowania ale pojazd poruszają się już po istniejącej drodze; budowla oraz droga są jeszcze w fazie projektowania) niezbędne jest obliczeniowe wyznaczenie sił bezwładności działających na budowlę podczas przejazdu pojazdów po pobliskiej drodze. W takich sytuacjach można wykorzystać metody obliczeń stosowane w analizowaniu wpływu drgań sejsmicznych i parasejsmicznych na budowlę. Jeśli źródło drgań generuje drgania podłoża o przebiegu nieregularnym często w obliczeniach korzysta się z tzw. metody spektrum odpowiedzi (por. [7]). Jej stosowanie w obliczeniach projektowych dopuszczają również dokumenty normowe dotyczące wyznaczania obciążeń wywołanych trzęsieniami ziemi (por. [83, 84, 87]) oraz działaniami parasejsmicznymi (por. [90]). Metodę spektrum odpowiedzi można stosować w projektowaniu oraz w analizie budowli związanej z diagnostyką (znane źródło drgań i zrealizowana już budowla). To ostatnie zastosowanie wymaga zarejestrowania drgań podłoża oraz na podstawie wyników rejestracji wyznaczenia odpowiedniego spektrum odpowiedzi. Otrzymuje się wówczas krzywe spektralne związane bezpośrednio z konkretnym przejazdem pojazdów w konkretnych warunkach ruchowo-drogowych i lokalizacji budowli. Chcąc jednak - podobnie jak to ma miejsce w obliczeniach sejsmicznych – zastosować metodę spektrum odpowiedzi w projektowaniu budowli należy powiązać kształt odpowiedniego spektrum odpowiedzi drgań drogowych z parametrami opisującymi warunki ruchowo-drogowe. Wówczas to będzie można przewidując wystąpienie założonych parametrów ruchowo-drogowych określić odpowiadające im spektrum odpowiedzi i wyznaczyć prognozowane siły bezwładności obciążające projektowaną budowlę.

W odniesieniu do drgań drogowych (wywołanych ruchem samochodowym) dotychczas w projektowaniu lub diagnostyce budowli korzystano ze spektrum odpowiedzi wyznaczanych z wibrogramów zarejestrowanych w konkretnych sytuacjach pomiarowych. Wyniki obliczeń odnoszono wówczas do takich sytuacji, które wystąpiły podczas pomiarów. Wcześniejsze prace badawcze, w których wyniku uzyskano tzw. modelowe spektra odpowiedzi drgań sejsmicznych (por. np. [62]) a także drgań górniczych (por. np. [48]) były podstawą sformułowania zadania, w wyniku rozwiązania którego można byłoby ocenić możliwości zbudowania podobnego, modelowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych. Modelowe spektrum odpowiedzi drgań drogowych będzie można wyznaczyć wówczas, jeśli uda się powiązać kształt tego spektrum z najistotniejszymi parametrami ruchowo-drogowymi charakteryzującymi przejazd pojazdów po drodze oraz samą drogę i jej otoczenie.

W wyniku przeprowadzonej analizy wielu rezultatów pomiarów dynamicznych wpływu drgań drogowych na budowle przedstawionych w literaturze oraz pewnych doświadczeń własnych sformułowano następującą tezę naukową, której udowodnienie przedstawione zostanie w niniejszej pracy:

***można zbudować model umożliwiający kształtowanie przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych w zależności od parametrów określających warunki ruchowe i warunki drogowe.***

Jeśli taki model zostanie zbudowany to będzie można wykorzystać go do oceny wpływu parametrów ruchowo-drogowych na kształt spektrum odpowiedzi. Wyniki takich analiz mogą być przydatne w kształtowaniu modelowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych

## **1.2 Cel i zakres pracy**

Celem pracy jest uzyskanie odpowiedzi na pytanie czy, które i w jakim stopniu parametry ruchowo-drogowe wpływają na kształt przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych. Dokonanie takiej oceny wymaga wcześniej zbudowania odpowiedniego modelu kształtowania spektrum odpowiedzi, czy relacji pomiędzy wejściem a wyjściem opisującymi model. Wejściem powinny być tu parametry ruchowo-drogowe, a wyjściem rzędne przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. Należy najpierw dokonać wyboru tych parametrów, które w sposób istotny wpływają na kształt i rzędne linii spektralnych; Następnie - zbudować model zjawiska. W kolejnych rozdziałach pracy przedstawiono wyniki badań prowadzących do osiągnięcia celu pracy atym samym udowodnienia tezy naukowej.

W rozdz. 2 opisano metodę spektrum odpowiedzi ukazując możliwości zastosowań tej metody dokonano w analizie wpływu na budowę drgań przekazywanych z podłoża. Przedstawiono również najważniejsze rezultaty prac badawczych z zakresu wyznaczania spektrum odpowiedzi drgań sejsmicznych i górniczych. Nawiązano również do wcześniejszych prac przedstawiających spektra odpowiedzi drgań drogowych.

W rozdz. 3 opisano oryginalnie zaprogramowany cykl własnych badań dynamicznych, które wykonano z użyciem nowoczesnej aparatury badawczej i oprogramowania wykorzystanego w analizie wyników badań. Wyniki pomiarów dynamicznych zostały przetworzone z użyciem techniki komputerowej. W ten sposób powstała oryginalna metodyka pomiarowo-interpretacyjna. Wyniki analiz zamierzano wykorzystać bezpośrednio do budowania modelu. Okazało się jednak, iż takie zbiory nie wystarczają jeszcze do osiągnięcia celu pracy. Podjęto więc próbę użycia narzędzia nowej generacji.

Do budowy modelu zjawiska opisującego wpływ drgań drogowych zastosowano sztuczne sieci neuronowe (SSN), których podstawy teoretyczne zostały opisane w rozdz. 4. Zauważono, iż SSN mogą skutecznie opisywać i identyfikować pewne parametry modelu, ucząc się na danych doświadczalnych, w procesie trenowania i testowania. Następnie tak nauczone SSN mogą służyć do symulacji zjawisk i ew. analizowania możliwości uogólnień. Przedstawiona w rozdz. 4 analiza publikacji, dostępnych w trakcie prowadzenia prac, umożliwiła identyfikację elementów wspólnych łączących zastosowania SSN do rozwiązywania problemów dynamiki konstrukcji, ze szczególnym uwzględnieniem inżynierii drogowej. Wiele z tych problemów podlega analizie wielokryterialnej. Stopień komplikacji zagadnień opisywanych w cytowanej literaturze ukazuje jak skuteczną jest symulacja zjawisk, z użyciem SSN.

W rozdz. 5 opisano konstruowanie modelu, który posłużył do wyznaczania spektrum odpowiedzi drgań drogowych przy założonych warunkach ruchowo-drogowych. SSN wykorzystano tu jako skuteczne narzędzie budowania modelu zjawiska. Opisano technikę budowania architektury SSN oraz zasady trenowania i testowania poszczególnych sieci. Porównano również otrzymane za pomocą różnych SSN i na tej podstawie wybrano model wykorzystany w dalszych analizach.

Rozdz. 6 pokazuje w jaki sposób można w praktyce stosować model zbudowany z wykorzystaniem SSN. Przedstawione w tym rozdziale wyniki analiz dotyczących wpływu różnych parametrów ruchowych i parametrów drogowych na kształt spektrum odpowiedzi drgań drogowych. Oddzielnie analizowano wpływ parametrów związanych ze źródłem drgań, związanych z drogą propagacji drgań w otoczeniu jezdni oraz parametrów związanych z odbiorem drgań przez budowlę. Na wybranych przykładach pokazano w jakim zakresie parametry ruchowo-drogowe wpływają na kształt przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. Stwierdzono, iż opracowany model spełnia warunki określone w sformułowanej na początku tezie pracy. Może być on doskonalony przez włączenie nowych informacji uzyskiwanych podczas kolejnych pomiarów dynamicznych.

W rozdziałach następnych opisano możliwości zastosowania modelu w projektowaniu i w diagnostyce budowli poddanych działaniu drgań drogowych oraz zestawiono wnioski końcowe odnosząc się w nich do oceny osiągnięcia celu pracy i udowodnieniu tezy naukowej podanej w 1.1. Na końcu pracy zamieszczono spis najważniejszych pozycji literatury wykorzystanej w pracy.

## 2 Spektrum odpowiedzi i jego zastosowanie do wyznaczania sił bezwładności

### 2.1 Ogólna charakterystyka metody spektrum odpowiedzi

Do wyznaczenia sił bezwładności generowanych ruchem podłoża w konstrukcji poddanej wymuszeniu kinematycznemu stosuje się z powodzeniem metodę spektrum odpowiedzi. Spektrum odpowiedzi jest znane w literaturze od dawna (por. [31, 34, 78]). Metoda spektrum odpowiedzi jest stosowana szeroko w praktyce inżynierskiej. Wprowadzona została również do wielu norm projektowania (np. [85, 86, 87, 89, 91]).

W spektrum odpowiedzi zawarte są informacje o maksymalnych wartościach parametrów ruchu oscylatora (ustroju o jednym stopniu swobody) poddanego wymuszeniu kinematycznemu. Równanie ruchu

$$m \ddot{y} + c \dot{y} + ky = -m \ddot{y}_g \quad (2.1.1)$$

opisuje drgania oscylatora. Po wprowadzeniu oznaczenia na częstość kątową oscylatora

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.1.2)$$

oraz wprowadzeniu opisu tłumienia za pomocą ułamka tłumienia krytycznego wg wzoru

$$\xi = \frac{c}{\sqrt{km}} \quad (2.1.3)$$

uzyskuje się następującą postać równania ruchu oscylatora

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \omega^2 y = -\ddot{y}_g \quad (2.1.4)$$

Prawa strona w tym równaniu opisuje znany przebieg w czasie przyspieszenia ruchu podłoża. Rozwiązanie równania w dziedzinie przemieszczeń względnych wyraża się wzorem:

$$y(t, \omega, \xi) = -\frac{1}{\omega_n} \int_0^t \ddot{y}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin(\omega_n(t-\tau)) d\tau \quad (2.1.5)$$

gdzie

$$\omega_n = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.1.6)$$

Maksymalne wartości przemieszczeń odpowiadające wielkościom  $\omega$  i  $\xi$ :

$$S_d = \max \left( \left| y(t, \omega, \xi) \right| \right) \quad (2.1.7)$$

określa się jako przemieszczeniowe spektrum odpowiedzi.

Maksymalne wartości prędkości odpowiadające wielkościom  $\omega$  i  $\xi$ :

$$S_v = \max \left( \left| \dot{y}(t, \omega, \xi) \right| \right) \quad (2.1.8)$$

określa się jako prędkościowe spektrum odpowiedzi.

Wartości maksymalnych przyspieszeń  $\left( \ddot{y} + \ddot{y}_g \right)_{\max}$  ruchu masy oscylatora

$$S_a = \max \left( \left| \ddot{y}(t, \omega, \xi) \right| \right) \quad (2.1.9)$$

określa się jako przyspieszeniowe bezwzględne spektrum odpowiedzi.

Oscylator jest ustrojem o 1 stopniu swobody dynamicznej, którego częstość kątową własną



wyraża się wzorem

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{2\pi}{T} \quad (2.1.10)$$

Związek pomiędzy przyspieszeniowym i przemieszczeniowym spektrum odpowiedzi można zapisać w postaci

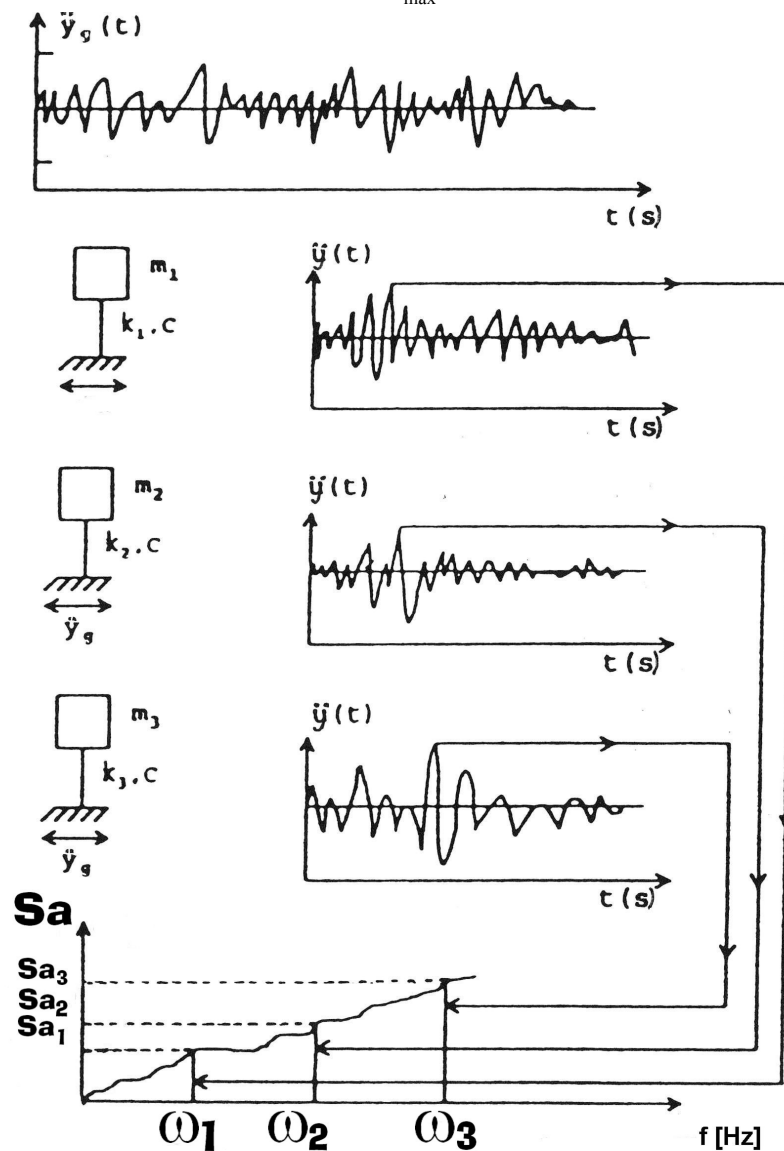
$$S_a = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 S_d \quad (2.1.11)$$

Spektrum odpowiedzi zawiera więc informacje o tym, jaki maksymalny efekt dynamiczny oscylatora zostanie wywołany wymuszeniem przyłożonym u jego podstawy (rys.2.1.1). Odnosząc rzędne przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi do wartości maksymalnej wymuszenia:

$$\max \ddot{y}_g = A_{\max}$$

uzyskuje się względne przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi:

$$\beta = \frac{S_a}{A_{\max}} \quad [-] \quad (2.1.12)$$



Rys. 2.1.1 Schemat wyznaczania przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi.

W celu wyznaczenia składowych  $P_{ik}$  siły bezwładności  $P_k$  obciążającej ustrój w wybranym kierunku  $k$ , w trakcie drgań z kolejnymi częstotliwościami drgań własnych  $f_i$  dla  $i=1, 2, \dots, j$ , gdzie  $j$  jest wymaganą, konieczną do uwzględnienia w obliczeniach minimalną liczbą kolejnych częstotliwości drgań własnych, można korzystać z opisu wymuszenia kinematycznego za pomocą spektrum odpowiedzi uzyskując wartości  $P_{ik}$  ze wzoru:

$$P_{ik} = Q_k \chi_{ik} \frac{S_a}{g} \quad [\text{kN}] \quad (2.1.13)$$

ładź

$$P_{ik} = \frac{A_{\max}}{g} Q_k \chi_{ik} \beta \quad [\text{kN}] \quad (2.1.14)$$

w których to wzorach

$$\chi_{ik} = c_{ik} \frac{\sum_{j=1}^n Q_j c_{ij}}{\sum_{j=1}^n Q_j (c_{ij})^2} \quad (2.1.15)$$

gdzie:

- $c_{ij}$  – rzędna postaci drgań w kierunku  $j$  odbywających się z częstotliwością własną  $f_i$ ;
- $Q_k$  – ciężar skupiony w punkcie  $k$ ;
- $g$  – przyspieszenie ziemskie.

Całkę opisaną wzorem (2.1.5) można wyznaczyć stosując jedną ze znanych metod numerycznych (por. [62, 63]).

Źródła drgań propagowanych w podłożu mogą być różne. W [7] podany został podział drgań tego typu w zależności od przyjętych kryteriów podziału. I tak podano tam następujące podziały:

I. Według pochodzenia drgań i urządzeń je wzbudzających na:

- a) drgania wzbudzone celowo podczas procesu technologicznego czy użytkowego; narzędziami wzbudzenia mogą być maszyny, urządzenia techniczne, procesy technologiczne (np. chemiczne, termiczne, akustyczne) wywołujące ruch ośrodka (uderzenia, eksplozje, itd.),
- b) drgania będące efektem ubocznym różnych działań celowych lub pracy urządzeń im towarzyszących; w tym przypadku źródłem drgań są maszyny, urządzenia albo procesy;
- c) drgania będące zjawiskiem losowym, wynikającym z działania sił przyrody niezależnych lub nieznacznie zależnych od człowieka (np. ekstremalny wiatr, trzęsienie ziemi).

II. Według sposobu wzbudzenia na:

- a) wzbudzenia zależne i kontrolowane (sterowane) przez człowieka,
- b) wzbudzenia zależne, kontrolowane tylko częściowo lub pośrednio,
- c) wzbudzenia zależne, ale nie kontrolowane przez człowieka,
- d) wzbudzenia niezależne i nie kontrolowane.

III. Według ciągłości i przebiegu wzbudzenia na:

- a) wzbudzenie ciągłe, regularne,
- b) wzbudzenie ciągłe lecz nieregularne,
- c) wzbudzenia krótkotrwałe o tym samym przebiegu powtarzające się w określonych odstępach czasowych,
- d) wzbudzenia krótkotrwałe powtarzające się nieregularnie o różnych przebiegach,
- e) wzbudzenia jednorazowe.

IV. Według zmiany położenia źródła w stosunku do miejsca odbioru drgań na:

- a) wzbudzone przez źródło niezmiennie, tzn. nie zmieniające położenia (umiejscowione),
- b) wzbudzone przez źródło zmieniające położenie w sposób określony, regularny (np. po torze, trasie)
- c) wzbudzone przez źródło zmieniające położenie w sposób nieregularny,
- d) wzbudzone przez źródło umiejscowione lub zmieniające położenie w sposób losowy.

V. Według położenia źródła względem budowli na:

- a) wzbudzone przez źródło położone wewnątrz budowli i przekazywane bezpośrednio na elementy budowli,
- b) wzbudzone przez źródło położone na zewnątrz budowli i przekazywane pośrednio (np. poprzez oddzielny fundament, podłoże, itp.).

Drgania podłoża występujące w obszarach aktywnych ruchów skorupy ziemskiej i niezależne od człowieka nazywa się drganiami (wstrząsami) sejsmicznymi. Drgania wywołane działaniem źródeł zależnych od człowieka, których propagacja odbywa się w podłożu określane są jako drgania (wstrząsy) parasejsmiczne. Do tej grupy zalicza się np. te, które pochodzą od wybuchów, mogą być wynikiem eksploatacji zasobów natury przez ludzi (np. roboty strzałowe w kamieniołomach), jak również mające charakter losowy ale generowane np. poprzez uwolnienie energii górotworu (tzw. wstrząsy górnicze).

Drgania występujące w otoczeniu szlaków komunikacyjnych, powstające wskutek ruchu pojazdów mechanicznych, zwane są drganiami komunikacyjnymi. Mogą generować je przejazdy pojazdów szynowych (koleje, tramwaje, metro) i pojazdów kołowych (samochody). Te ostatnie określa się także jako drgania drogowe.

Źródłami drgań parasejsmicznych mogą być maszyny eksploatowane przy pracach ziemnych (np. drgania wywołane podczas wbijania pali i ścianek w grunt przez kafary czy wibromłoty) jak również maszyny umieszczone na własnych fundamentach.

Stosowanie metody spektrum odpowiedzi do obliczeniowego wyznaczenia sił bezwładności, obciążających budowlę podczas jej drgań wywołanych ruchem podłoża, wymaga informacji o kształcie przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. Spektra odpowiedzi drgań sejsmicznych są już stosowane w takim stopniu, że wprowadzono je nawet do norm projektowania budowli na te działania. W ostatnich latach przeprowadzono wiele badań i analiz w zakresie rozpoznania kształtów spektrów odpowiedzi drgań generowanych wstrząsami górniczymi (por. np. [52, 54, 80]). W niniejszej pracy podjęto próbę skonstruowania na podstawie badań i analiz modelu umożliwiającego wyznaczenie spektrum odpowiedzi drgań podłoża generowanych ruchem pojazdów kołowych.

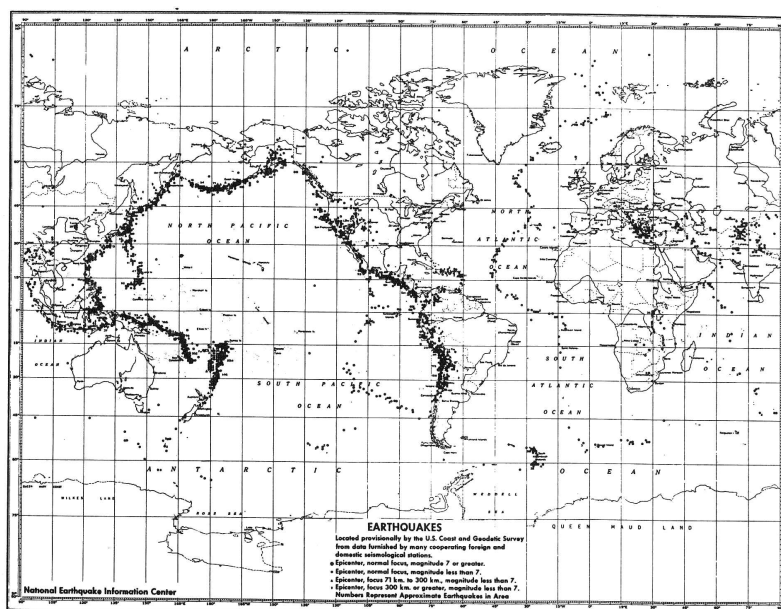
## 2.2 Spektrum odpowiedzi wstrząsów sejsmicznych

Wstrząsy sejsmiczne powstają wskutek ruchów tektonicznych i uwalniania się skumulowanych porcji energii pod skorupą ziemską. Wynikiem wstrząsu są fale sejsmiczne, propagujące się w ziemi na określonym obszarze okalającym miejsce epicentralne. Efektem propagacji fal sejsmicznych jest ruch podłoża i wywołany tymi drganiami ruch budowli.

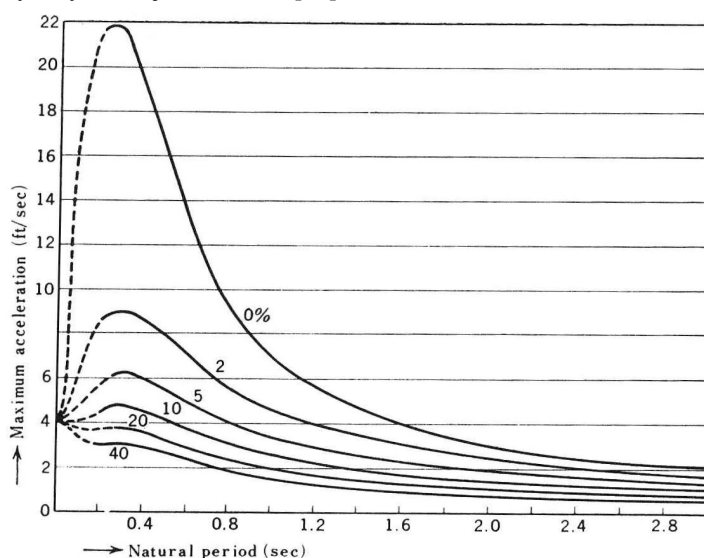
Na rys.2.2.1 za [78] przedstawiono mapę świata z zaznaczeniem obszarów czynnych sejsmicznie. Budowle posadowione na tych obszarach należy analizować z uwzględnieniem sił sejsmicznych generowanych ruchem podłoża podczas prognozowanego trzęsienia ziemi. W zaleceniach normowych dopuszcza się stosowanie w obliczeniach metody spektrum odpowiedzi. Opracowano różne modelowe spektra odpowiedzi wstrząsów sejsmicznych. Spektra opracowane w wyniku analizy przebiegów czasowych zarejestrowanych wstrząsów były wprowadzone do norm projektowania (por. [15]) w poszczególnych krajach oraz do zaleceń międzynarodowych (por. [89]), regionalnych (por. [[87]) i branżowych (np. [84])

W [32] przedstawiono wyniki analizy obejmującej cztery najbardziej znaczące

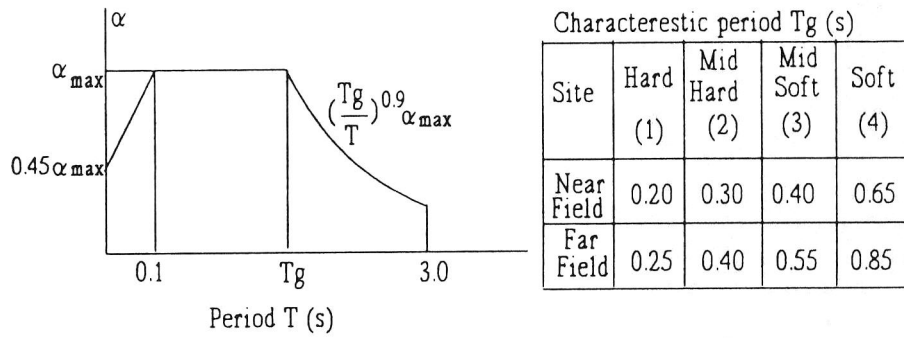
trzęsienia ziemi w USA i powstałe w ich wyniku spektra odpowiedzi jako uśrednione i wygładzone (por. rys. 2.2.2) wprowadzono do normy amerykańskiej [93]. W późniejszych pracach (por. [58]) zwracano uwagę na braki i mankamenty tak opracowanych spektrów. Podkreślono, iż konieczne jest uwzględnienie w kształtowaniu spektrum modelowego wpływu takich czynników jak np. rodzaj podłoża. Opis spektrów odpowiedzi drgań sejsmicznych wprowadzonych do norm wybranych krajów przedstawiono m.in. w [6]. Najczęściej przedstawia się je w postaci spektrum względnego (tzn. odnosząc rzędne spektrum przyspieszeniowego do wartości maksymalnej przyspieszenia w przebiegu czasowym) starając się uwzględnić w kształcie spektrum wpływ różnych czynników. Możliwy jest więc opis kształtu spektrum w zależności od: tłumienia konstrukcji, rodzaju podłoża, intensywności obszaru sejsmicznego i innych czynników. Przykład uogólnionego kształtu spektrum odpowiedzi drgań sejsmicznych podano na rys. 2.2.3 za [88]. Spektrum to uwzględnia wpływ rodzaju podłoża (kategoria gruntu od 1 do 4). Na rys. 2.2.4 podano za normą [92] kształt modelowego spektrum odpowiedzi odpowiadający tłumieniu 5% przy różnych kategoriach podłoża. Niektóre normowo przyjęte kształty spektrum odpowiedzi wstrząsów sejsmicznych pokazano tu za [6] na rys. 2.2.5. Uwzględniają one m.in. wpływ rodzaju podłoża, tłumienia konstrukcji oraz prognozowaną intensywność trzęsienia ziemi.



Rys. 2.2.1 Obszary aktywne sejsmicznie za [78].

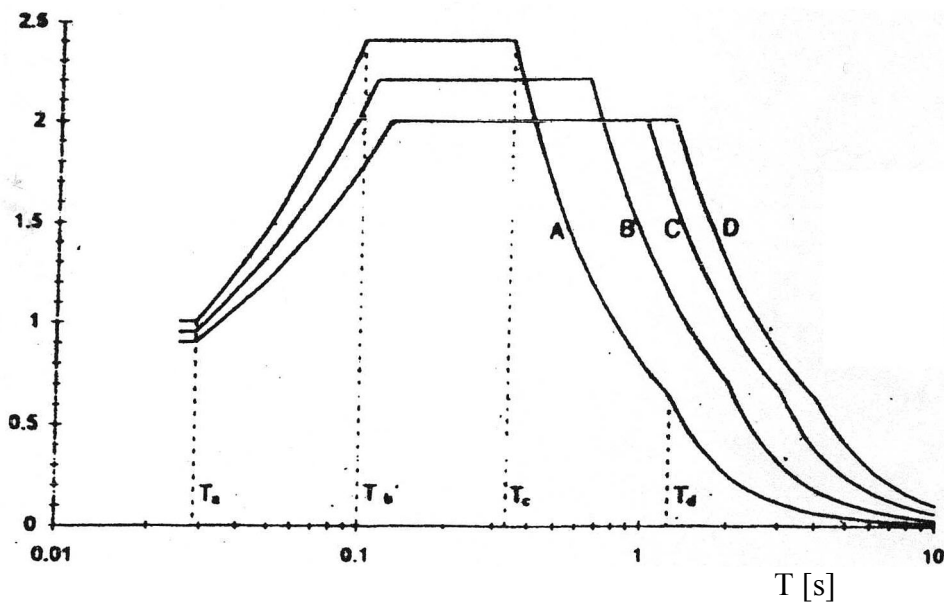


Rys. 2.2.2 Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi odpowiadające różnym wartościom  $\xi = 0 \dots 40\%$  za [93].

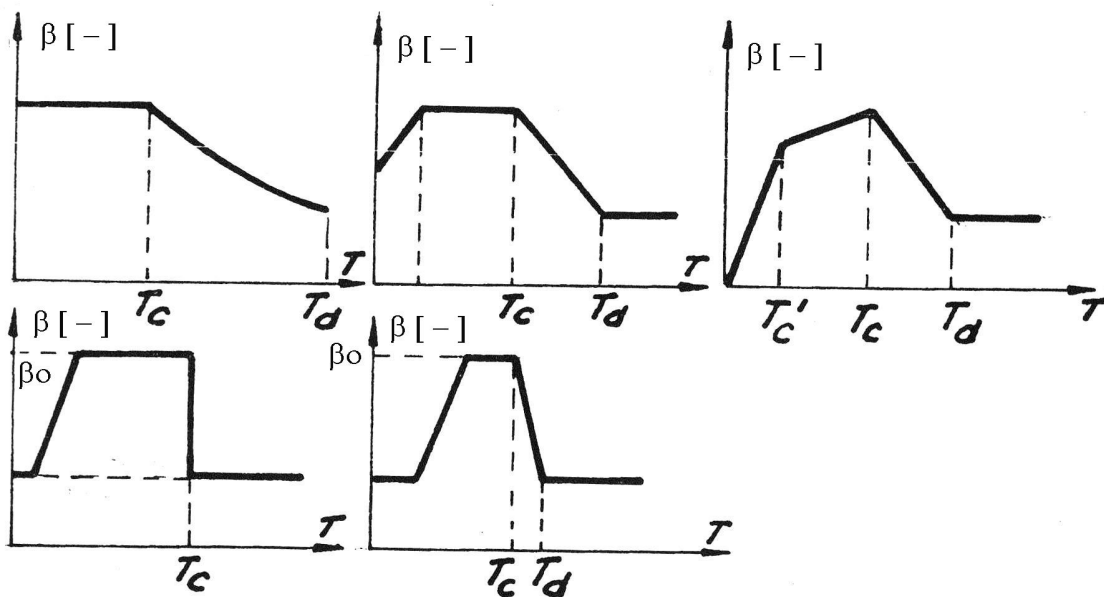


Rys. 2.2.3 Spektra odpowiedzi przy tłumieniu 2% za [88].

$\beta [-]$



Rys. 2.2.4 Spektra odpowiedzi przy tłumieniu 5% za [92].



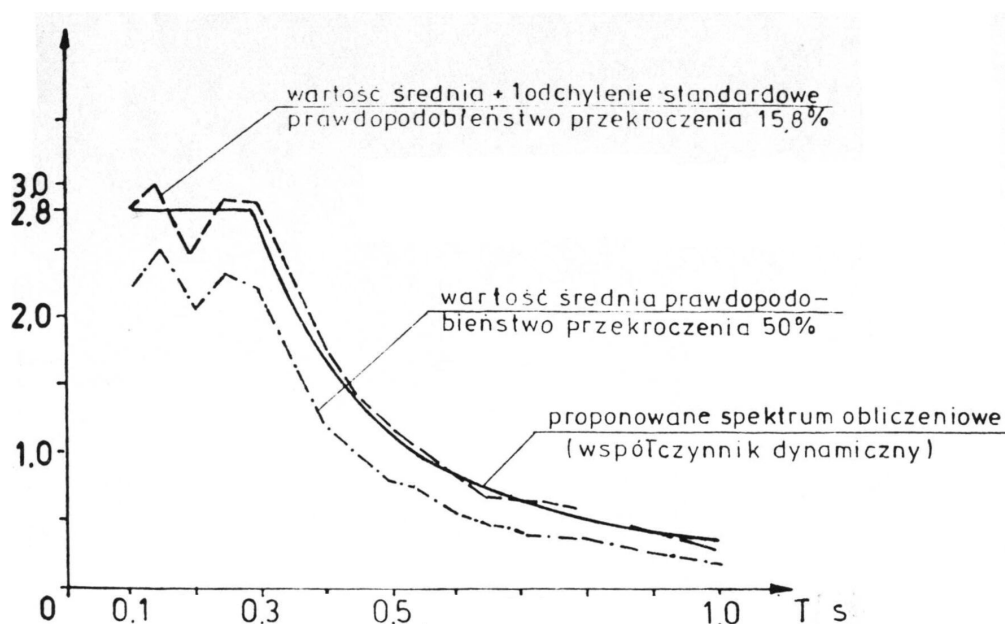
Rys. 2.2.5 Kształty modelowych spektrum odpowiedzi za [6].

### 2.3 Spektra odpowiedzi wstrząsów górniczych

Wstrząsy górnicze generują drgania podłoża, które mogą być wymuszeniem kinematycznym budowli. W obliczeniowym ujęciu wpływu wstrząsów górniczych na budowle może być stosowana metoda spektrum odpowiedzi. Z tego wynika zainteresowanie badaniami, w których wyniku można uzyskać modelowe spektra odpowiedzi drgań górniczych. W Polsce występują obszary objęte wpływem wstrząsów górniczych i stąd wynika bezpośrednie zainteresowanie rezultatami badań i analiz prowadzących do uzyskania informacji o kształcie modelowych spektrum odpowiedzi wstrząsów górniczych.

Wprawdzie wstrząsy górnicze znacznie różnią się od wstrząsów sejsmicznych (m.in. czasem trwania, zakresem częstotliwości, czy dominującym kierunkiem drgań) to jednak w analizowaniu ich wpływu na budowle stosuje się metody obliczeniowe z inżynierii sejsmicznej. W wyniku analizy rejestrowanych wstrząsów rozpoczęto prace nad określeniem cech charakterystycznych spektrum odpowiedzi drgań górniczych [80]. Rezultatem analiz było zaproponowanie wzorcowych przyspieszeniowych spektrum odpowiedzi odnoszą się do obszaru Polkowic (LGOM) - rys.2.3.1. Podobne wykresy spektrum odpowiedzi dla obszarów Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) przedstawiono w [51, 61].

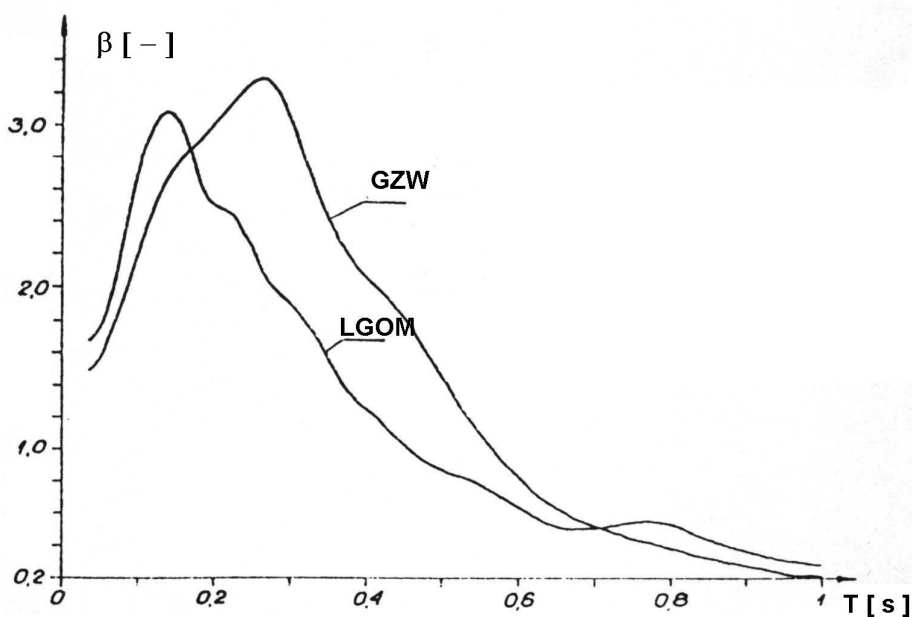
$\beta [-]$



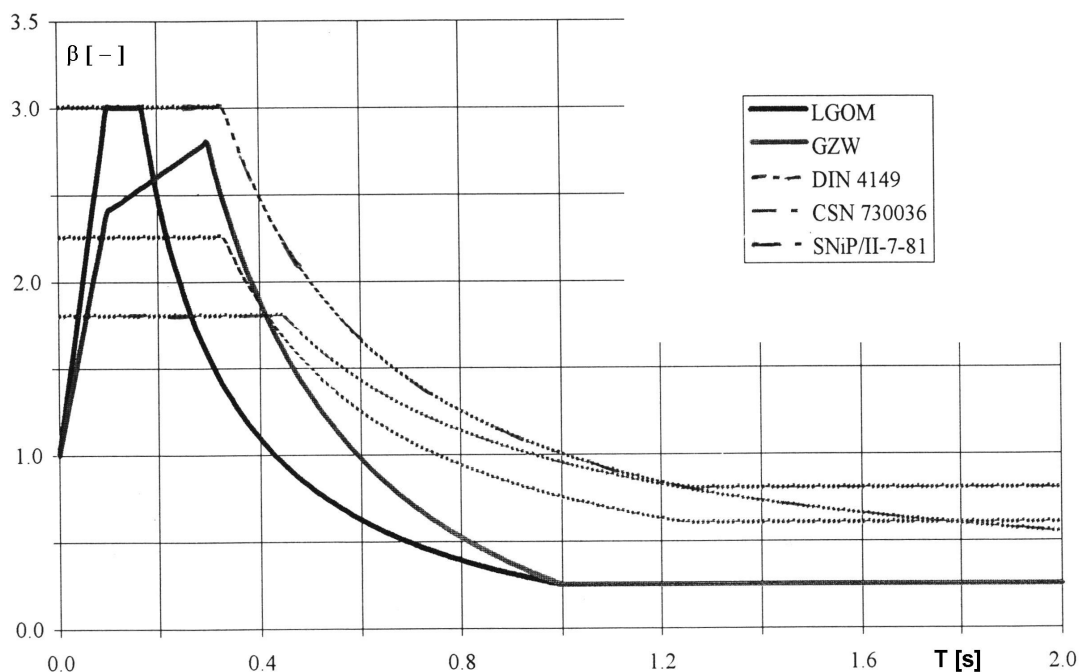
Rys. 2.3.1 Spektrum odpowiedzi w rejonie Polkowic przy 5% ułamku tłumienia krytycznego za [80].

W Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej od wielu lat prowadzono prace nad usystematyzowaniem i uściśleniem interpretacji wstrząsów górniczych i ich wpływów na budowle. Wyniki tych prac wykorzystywano w analizie zjawisk dynamicznych występujących na terenach GZW i LGOM, w odniesieniu do typowych (prefabrykowanych) budynków mieszkalnych [9]. Zaproponowano (por np. [54]) uściślenie spektrum odpowiedzi dla GZW oraz LGOM. Propozycje te przedstawiono na rys. 2.3.2. W propozycji ujęcia normowego zaś zmodyfikowano i uproszczono kształt wzorcowych spektrum odpowiedzi [48, 49] obliczonych na podstawie usystematyzowanych przebiegów drgań powierzchniowych regularnie rejestrowanych w okresie wielu lat. Rys. 2.3.3 przedstawiony tu za [48], podaje wzorcowe spektra odpowiedzi dla GZW i LGOM w porównaniu z normowymi spektrami odpowiedzi drgań sejsmicznych stosowanymi w sąsiednich krajach (b. CSRS, b. NRD) oraz zalecanymi przez ITB [36] (te ostatnie nawiązują do normy sejsmicznej z b. ZSRR). Na uwagę zasługuje fakt, że proponuje się

określenie różnych krzywych spektralnych na obszarze LGOM i GZW.



Rys. 2.3.2 Spektrum odpowiedzi na obszarze LGOM i GZW przy 2.5% ułamku tłumienia krytycznego za [54].



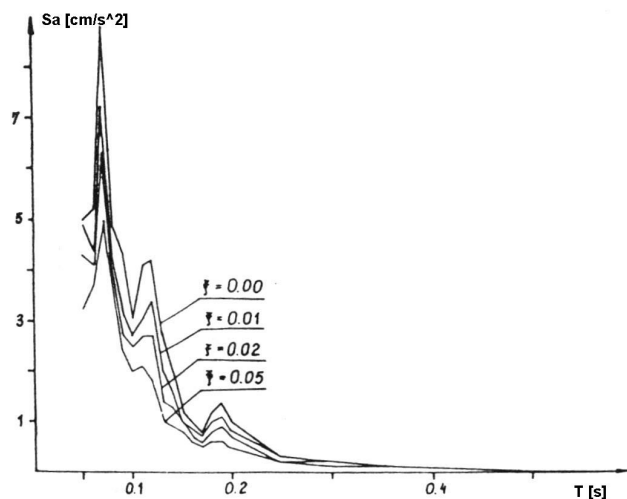
Rys. 2.3.3 Uproszczony kształt spektrum odpowiedzi na obszarze LGOM i GZW przy 2.5% wartości ułamka tłumienia krytycznego wraz ze spektrami odpowiedzi drgań sejsmicznych przyjętymi w normach krajów sąsiednich za [48].

## 2.4 Spektra odpowiedzi drgań komunikacyjnych

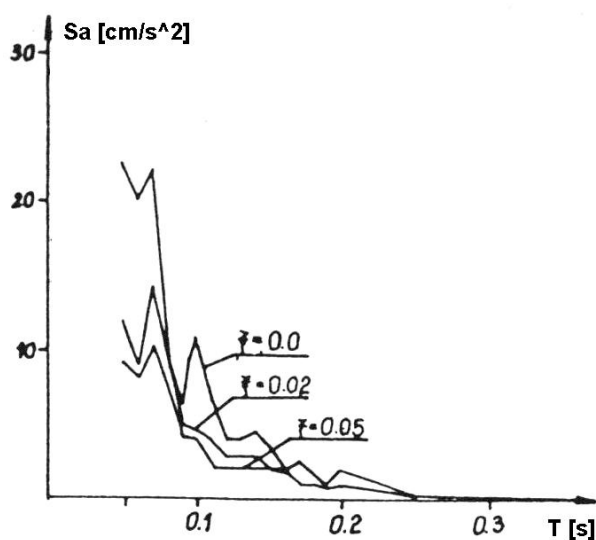
W [11] scharakteryzowano metodę obliczania spektrum odpowiedzi i zastosowano ją do obliczenia przykładowych spektrum odpowiedzi drgań drogowych. Spektra te wyznaczono na podstawie przebiegów przyspieszeń bądź przemieszczeń drgań poziomych, prostopadłych do osi drogi, wywołanych przejazdem pojazdów kołowych. Rejestracje przeprowadzono przy różnym usytuowaniu czujników pomiarowych. Umieszczono je zarówno w budynku, w poziomie terenu, jak i na gruncie w sąsiedztwie budynku. Przedstawiono przemieszczeniowe oraz przyspieszeniowe spektra odpowiedzi odpowiadające różnym współczynnikom tłumienia.

Przykładowe spektra przyspieszeniowe podano na rys.2.4.1 Wyniki rozwinięto w obszerniejszym opisie podanym w [8]. Wykorzystano tam pomiary drgań zarejestrowanych podczas przejazdu z różnymi prędkościami pojazdów ciężkich (samochodów ciężarowych z przyczepami lub bez) i autobusów. Zarejestrowane przebiegi czasowe posłużyły do obliczenia spektrów odpowiedzi wybranych drgań drogowych.

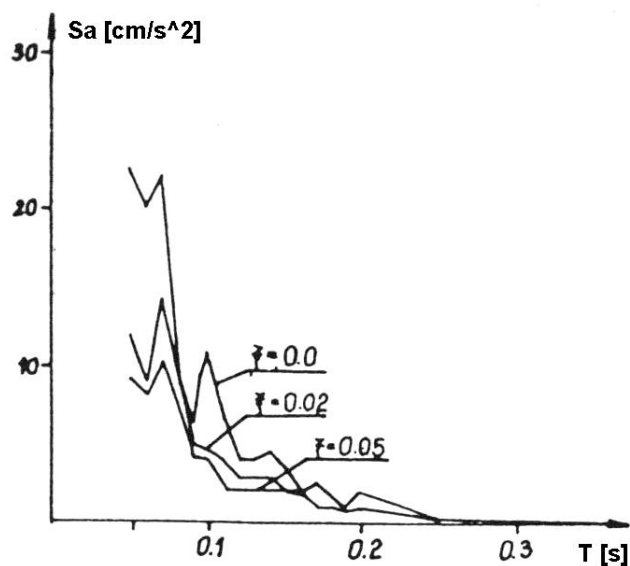
a)



b)



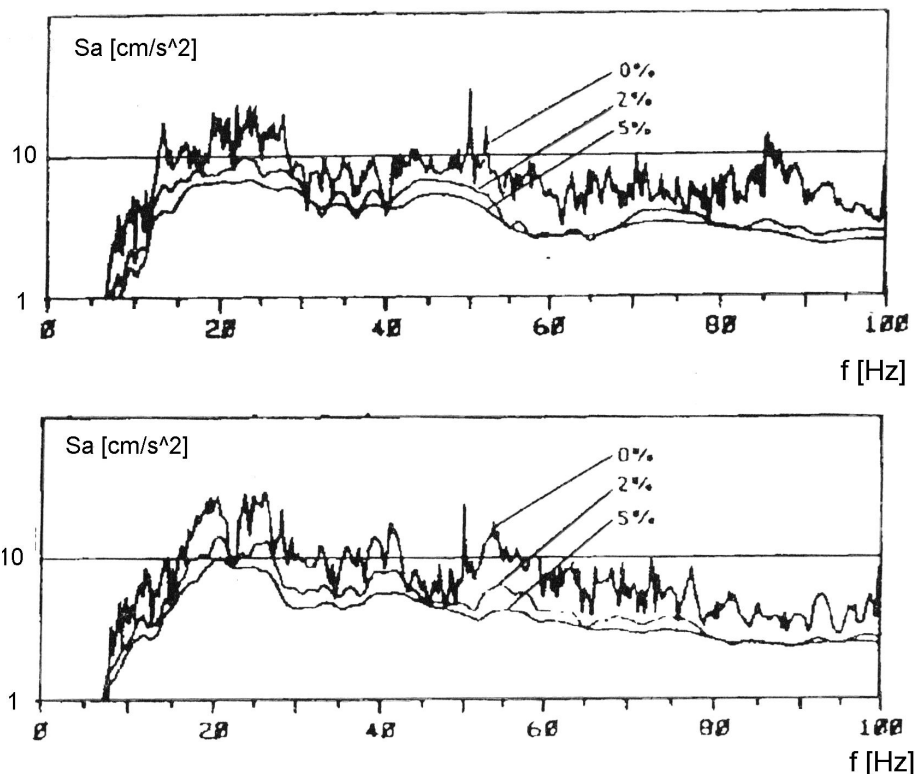
c)



Rys. 2.4.1 Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi drgań drogowych za [11].

W pracy [13] przedstawiono przykładowe przyspieszeniowe spektra odpowiedzi drgań poziomych, obliczone przy różnych współczynnikach tłumienia, na podstawie wibrogramów zarejestrowanych przy przejeździe samochodów ciężarowych przez sztuczną przeszkodę (próg) usytuowaną w przekroju pomiarowym. Rejestracje przeprowadzono umieszczając czujniki pomiarowe na fundamencie czterokondygnacyjnego budynku murowanego. Spektra te odpowiadają przejazdowi tego samego pojazdu obciążonego i pustego jadącego wzdłuż osi jezdni, oddalony od krawędzi budynku o 8.50 m. Wykresy spektrów podano na rys. 2.4.2.





Rys. 2.4.2 Spektra odpowiedzi drgań wywołanych przejazdem pojazdów ciężkich przez sztuczną przeszkodę za [13].

Wszystkie dotychczas przedstawiane kształty spektrów odpowiedzi drgań drogowych uzyskiwano w wyniku obliczeń z uwzględnieniem rezultatów badań doraźnych. Nie umożliwiała to jeszcze prognozowania kształtu spektrum odpowiedzi na podstawie informacji o projektowanych warunkach przejazdu pojazdów. Nie przedstawiono bowiem dotychczas propozycji odnośnie do takiego modelu, który umożliwiałaby wyznaczenie kształtu spektrum odpowiedzi drgań drogowych w zależności od założonych parametrów ruchowo-drogowych.

### 3 Wybór parametrów ruchowo-drogowych istotnie wpływających na drgania wywołane przejazdem pojazdów kołowych

#### 3.1 Przegląd wybranych wyników badań

Spośród publikacji podejmujących problemy postawione w niniejszej pracy na szczególną uwagę zasługuje monografia [10]. Opis wyników własnych prac jej autorzy poprzedzili prezentacją wiedzy zawartej w wielu wcześniejszych publikacjach zagranicznych i polskich. W monografii tej podano też podstawy teoretyczne rozprzestrzeniania się fal w ośrodku nieograniczonym, opisy modelowe i wyniki badawcze tłumienia drgań w gruncie oraz metodykę pomiarową stosowaną w badaniach drgań parasejsmicznych. Zajęto się również procesem generowania i przekazywania się drgań wzbudzonych przejazdem pojazdów z jezdni do otoczenia. Podano także wyniki pomiarów drgań budynków wywołanych przejazdami pojazdów kołowych różnych typów i w różnych warunkach eksploatacji jezdni. Przedstawiono sposoby zmniejszenia wpływów dynamicznych na budynki. Praca zawiera bardzo liczne odwołania do literatury oraz przykłady wielu badań własnych.

W [10] opisano proces generowania i propagacji drgań komunikacyjnych. W wyniku przejazdu pojazdu kołowego następuje:

- a) generowanie sił dynamicznych na styku koła pojazdu - powierzchnia jezdni,
- b) wzbudzanie drgań w konstrukcji jezdni przez siły dynamiczne, które na zasadzie sprzężenia oddziałują na drgania pojazdu,
- c) przekazywanie się tych drgań do gruntu pod jezdnią i w sąsiedztwie jezdni,
- d) propagacja drgań w podłożu gruntowym,
- e) przekazywanie tych drgań na obiekty w sąsiedztwie jezdni, pozostające w zasięgu propagowanych drgań,
- f) dynamiczna odpowiedź obiektu na przekazywane drgania.

Z kolei w [33] drgania drogowe rozważane są jako proces losowy i statystycznie stacjonarny w funkcji czasu. Opisany jest tam model sprężystej półprzestrzeni i analizowane obciążenie dynamiczne wynikające z działania modelu pojazdu na tę półprzestrzeń, a także reakcja dynamiczna w pewnej odległości od przyłożonego obciążenia. Model ten porównano z rezultatami pomiarów przeprowadzonych na autostradzie usytuowanej na gruntach jednorodnych (do pewnej głębokości). Uproszczenia modelowe prowadziły jednak do znacznych różnic w wynikach obliczeń i pomiarów.

W [12] przedstawiono analizę drgań budowli w centrum miasta poddanych wymuszeniom wywołanych przejazdem pojazdów samochodowych oraz szynowych.

W dotychczasowych pracach zjawisko drgań drogowych analizowane było głównie w sposób deterministyczny poprzez rejestrację wybranych parametrów dynamicznych (np. przyspieszeń, prędkości bądź przemieszczeń drgań) wywołanych przejazdem pojazdów ciężkich. Wykonano wiele badań dotyczących wpływu prędkości i ciężaru pojazdów na generowanie sił dynamicznych w otoczeniu drogi (por. [50], [79]) zarówno w normalnych, jak i w awaryjnych warunkach eksploatacji jezdni. Przez warunki awaryjne rozumie się tu rzeczywiste bądź symulowane nierówności jezdni. Symulację taką uzyskano przez wprowadzenie sztucznego progu w wybranym przekroju poprzecznym jezdni. Przejazd przez nierówność powoduje amplifikację drgań generowanych przez pojazd i przekazywanych do otoczenia drogi. I tak np. w pracy [13] przeprowadzono ocenę widmowych gęstości mocy drgań wywołanych przejazdem pojazdów po jezdni o dobrym stanie technicznym i uszkodzonej. Pokazano w jakim stopniu wystąpienie uszkodzeń na jezdni wywołuje wzrost drgań generowanych przejazdem pojazdu przez miejsce uszkodzenia.

Rejestrację drgań i ich późniejszą analizę wykorzystuje się również w inżynierii wojskowej przy identyfikacji typów pojazdów (por. [68]).

W [7] zestawiono najważniejsze problemy dotyczące drgań wywołanych ruchem pojazdów po trasach komunikacyjnych oraz ich wpływu na budowle w pobliżu tych tras. Przedstawiono też mechanikę powstawania i propagacji drgań oraz kryteria diagnostyczne i sposoby działań prowadzące do zmniejszenia ich wpływu.

## **3.2 Wstępne badania własne i ich wyniki**

### **3.2.1 Cel badań wstępnych**

Na podstawie przeglądu wybranych badań, z którego krótkie sprawozdanie przedstawiono w p. 3.1 wykonano kilka pomiarów drgań generowanych przejazdem pojazdów i przeprowadzono analizę ich wyników. Przyjęto, że badania i analizy zrealizowane w tym etapie zostaną wykorzystane do weryfikacji metodyki pomiarowo-interpretacyjnej zaproponowanej do stosowania w dalszych etapach badań prowadzących do zbudowania modelu umożliwiającego wyznaczanie spektrum odpowiedzi w zależności od prognozowanych warunków ruchowo-drogowych. Ponadto celem badań wstępnych było rozszerzenie zbioru informacji o wpływie wybranych parametrów ruchowo-drogowych na poziom drgań generowanych przejazdem pojazdów. Celem badań wstępnych było także sprawdzenie procedur, opracowanych w ramach niniejszej pracy, prowadzących do uzyskania niezbędnych informacji o kształcie spektrum odpowiedzi drgań drogowych.

Starano się ocenić w jakim stopniu zbiór informacji uzyskanych w wyniku badań doraźnych w różnych warunkach ruchowych i drogowych może posłużyć do zbudowania ogólnego modelu zjawiska. Jeżeli taki model byłby możliwy do uzyskania, to zamierzano sprawdzić czy mógłby być użyty do prognozowania wpływu drgań drogowych w projektowanych warunkach na projektowany obiekt budowlany. W ten sposób dysponując informacjami o przewidywanych warunkach ruchowych i drogowych oraz o lokalizacji budowli względem projektowanej drogi można byłoby wyznaczyć prognozowane spektrum odpowiedzi drgań drogowych. Na tej podstawie - korzystając już z ogólnych zasad dynamiki budowli albo wprowadzając dopuszczalne przez normy uproszczenia (np. w normie [90]) - można byłoby wyznaczyć spodziewane siły bezwładności dodatkowo obciążające budowle w czasie przejazdu pojazdów po drodze oraz określić spodziewane przyspieszenia ruchu w miejscach przebywania ludzi w budowli i na tej podstawie dokonać oceny zapewnienia warunków komfortu przebywania ludzi w pomieszczeniu o określonym jego przeznaczeniu. Tak więc podstawowym zadaniem staje się zbudowanie modelu umożliwiającego wyznaczenie spektrum odpowiedzi drgań drogowych i powiązanie wielkości charakteryzujących to spektrum z parametrami opisującymi warunki ruchowe i drogowe.

### **3.2.2 Charakterystyka przyjętej metodyki pomiarowo-interpretacyjnej**

Badania doraźne, których wyniki były wykorzystane w charakteryzowaniu kształtu spektrum odpowiedzi drgań drogowych, przeprowadzono w kolejnych etapach:

- ◆ wybór przekroju poprzecznego drogi (ulicy),
- ◆ wybór usytuowania punktów pomiarowych (założono, że punkty pomiarowe będą umieszczane co najmniej: na krawędzi jezdni (krawężniku), na podłożu przed budowlą, na fundamencie lub ścianie piwnicznej budowli, na jednym z wybranych stropów budowli); w punktach pomiarowych umieszczano czujniki (np. akcelerometry) tak, aby umożliwić rejestrację drgań poziomych w kierunku  $x$  (kierunek prostopadły do osi drogi) i w miarę potrzeby w innych kierunkach.
- ◆ realizacja pomiarów ciągłych (tzw. eksperyment bierny) z rejestracją cyfrową lub analogową wielkości pomierzonych wraz z jednoczesną rejestracją (na taśmie wideo) obrazu pojazdów przejeżdżających po jezdni a także prędkości i czasu przejazdu tych pojazdów w badanym przekroju drogi,

- ◆ realizacja pomiarów sterowanych (tzw. eksperyment czynny) z rejestracją wielkości mierzonych podczas przejazdu sterowanego pojazdu z zadaną prędkością, po wybranym pasie jezdni, z możliwością zastosowania progów na trasie przejazdu,
- ◆ analiza cyfrowa wyników pomiarów, w wyniku której wyznacza się spektrum odpowiedzi drgań drogowych przypisane warunkom ruchowym odpowiadającym sytuacji pomiarowej.

Wynikiem analizy każdej, pojedynczej rejestracji jest:

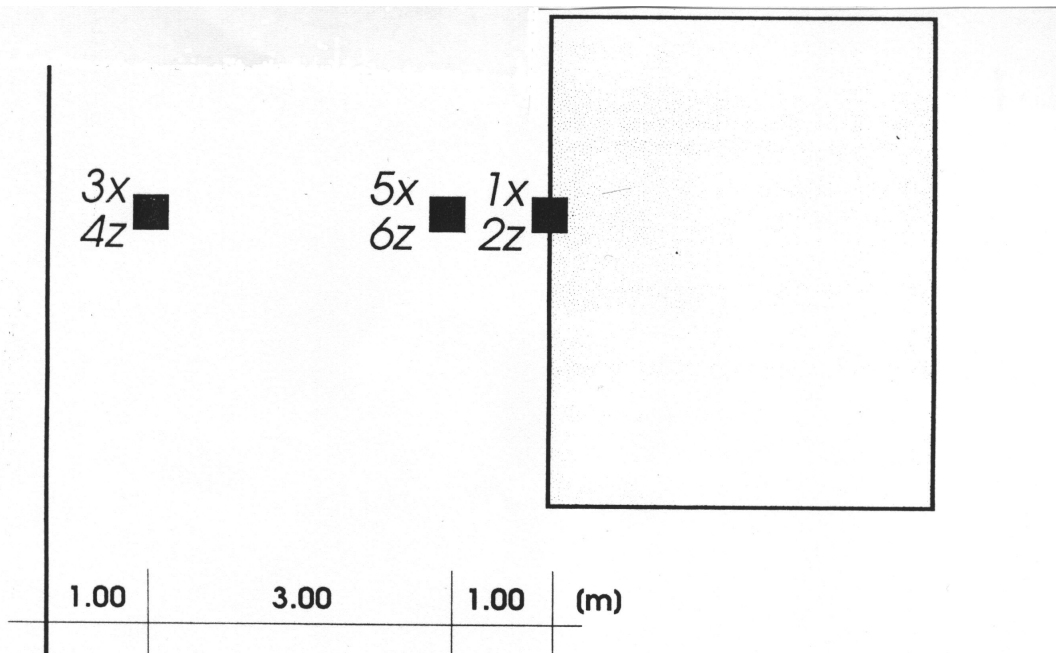
- ◆ wykres przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi (rządne spektrum odpowiadają kolejnym częstotliwościom drgań i są wyznaczone przy założeniu tłumienia drgań opisanego ułamkiem tłumienia krytycznego o wartości 2%<sup>1</sup>),
- ◆ odpowiadający temu wykresowi zbiór informacji o przejeżdżających pojazdach po poszczególnych pasach ruchu, ich prędkości i ewentualnie innych danych charakteryzujących warunki ruchowe i drogowe.

W tej fazie prac wykorzystano wyniki pomiarów własnych oraz kilku pomiarów wcześniejszych wybranych z archiwum Laboratorium Instytutu Mechaniki Budowli. Spośród analizowanych wyników wielu pomiarów tu opisano jako przykładowe badania przeprowadzone w dwóch przekrojach pomiarowych. Pierwszy z nich (przekrój 1) dotyczy pomiarów archiwalnych (opisano je w [67]). Drugi zaś pomiarów własnych. Pomiary w przekroju 1, który schematycznie ukazano na rys. 3.2.1, przeprowadzono przy użyciu akcelerometrów. W torze pomiarowym do rejestracji przyspieszeń drgań znajdowały się piezoelektryczne czujniki drgań produkcji Brüel i Kjaer typ 8306 wraz ze wzmacniaczami ładunku typ 2626 i zasilaczami typ 2805 oraz rejestrator magnetyczny typ 7003. Mierzono wartości przyspieszeń w kierunku „x” (poziomym - prostopadłym do osi drogi) oraz w kierunku pionowym „z” w każdym z punktów pomiarowych. Położenie niektórych akcelerometrów w badanym przekroju było zmieniane tak, by zarejestrować drgania gruntu w różnych punktach przekroju pomiarowego. Każdorazowo jednak czujniki umieszczane na ścianie budowli (przy jej podstawie) nie zmieniały położenia. Rejestrowano również prędkości przejazdu pojedynczych pojazdów dwupasową jezdnią po pasie bliższym zabytkowej budowli. Archiwalne rejestracje analogowe przetworzono do postaci cyfrowej przy użyciu karty przetworników analogowo-cyfrowych DAS i programu Asyst (por. [18]) z częstotliwością próbkowania 256 Hz, z zastosowaniem dolnoprzepustowego filtra analogowego o częstotliwości 50 Hz. Przebiegi czasowe drgań otrzymane w ten sposób posłużyły do dalszej analizy, w wyniku której stosując procedury Nigama-Jenningsa [63], obliczano przyspieszeniowe spektra odpowiedzi. Przyjmowano różne wartości ułamka tłumienia krytycznego. Analizowano różne kierunki rejestrowanych przyspieszeń (pionowy oraz poziomy, prostopadły do osi drogi). Wyznaczano również przyspieszeniowe spektra względne (uzyskane przez odniesienie rządnych spektrum odpowiedzi do maksymalnej wartości przyspieszenia odpowiadającego danemu przejazdowi). Uzyskane wyniki przedstawiono w formie wykresów odpowiadających wartościom ułamka tłumienia krytycznego  $\xi = 2\%$ .

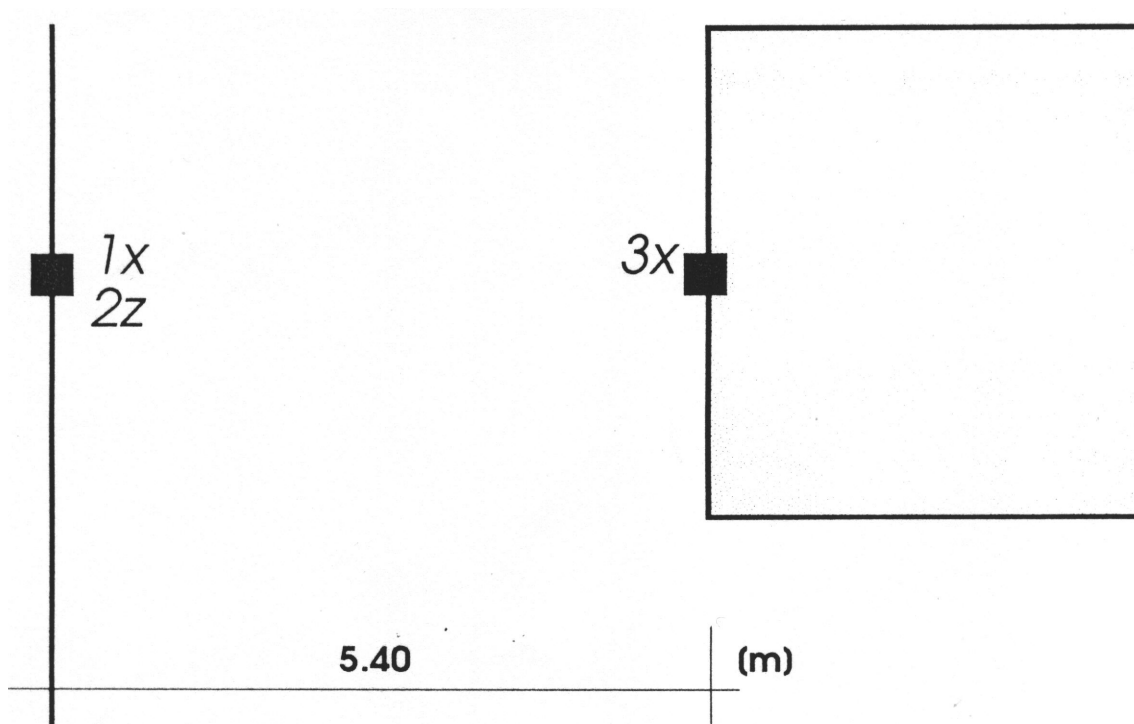
We wstępnych badaniach własnych, które reprezentują wyniki odnoszące się do przekroju 2, przedstawionego schematycznie na rys. 3.2.2, wprowadzono pierwszy punkt pomiarowy na krawędzi jezdni (drogi) a zarejestrowane tam wyniki łączono bezpośrednio z działaniem źródła drgań. Podczas badań w przekroju 2 rejestrowano przyspieszenia ruchu wywołane przejazdami m.in. autobusów, samochodów ciężarowych oraz przejazdem dźwigów kołowych w trakcie normalnego ruchu drogowego w otoczeniu budowli. Pomiary przeprowadzono w ten sposób, iż jeden z punktów pomiarowych usytuowano na krawędzi dwupasowej ulicy dwukierunkowej, asfaltowej z licznymi uszkodzeniami nawierzchni, o szerokości każdego z pasów równej 3.60 m. Kolejny punkt pomiarowy umieszczono na odległej o 5.40 m budowli u jej podstawy. Przekrój pomiarowy dobrano tak, aby odległość

<sup>1</sup> Tłumienie scharakteryzowane wartością  $\xi = 2\%$  odpowiada np. konstrukcjom wykonanym w technologii żelbetowej lub mieszanej (żelbet-mur).

między jezdnią a budowlą była minimalna. Rejestrowano, podobnie jak poprzednio, drgania pionowe i poziome w kierunku prostopadłym do osi drogi.



Rys. 3.2.1 Usytuowanie czujników pomiarowych w przekroju 1 (w odniesieniu do krawędzi jezdni oraz budowli).



Rys. 3.2.2 Usytuowanie czujników pomiarowych w przekroju 2 (w odniesieniu do krawędzi jezdni i budowli).

### 3.2.3 Ogólna prezentacja i ocena wyników badań wstępnych

Obie przeprowadzone wstępnie serie badań dotyczyły miejsc położonych w centrach dużych miast, gdzie ruch drogowy charakteryzuje się znacznym natężeniem. W przypadku badań przeprowadzonych w przekroju 1 wykonano pomiary drgań generowanych

przejazdami pojazdu sterowanego. Pozwoliło to na ocenę zależności poziomu generowanych drgań od prędkości przejazdu pojazdu, przy niezmiennych innych parametrach drogowo-ruchowych (zamknięty odcinek drogi, ten sam przekrój pomiarowy, ta sama masa pojazdu i stopień jego wypełnienia). Na tej podstawie można było ocenić wpływ prędkości przejazdu na poziom generowanych drgań i odbiór ich przez budowlę. W tabelicy 3.2.1 zamieszczono informacje o wynikach pomiarów w przekroju 1.

**Tabela 3.2.1** Zestawienie informacji o parametrach drgań poziomych, prostopadłych do osi drogi, zarejestrowanych w trakcie pomiarów w przekroju 1.

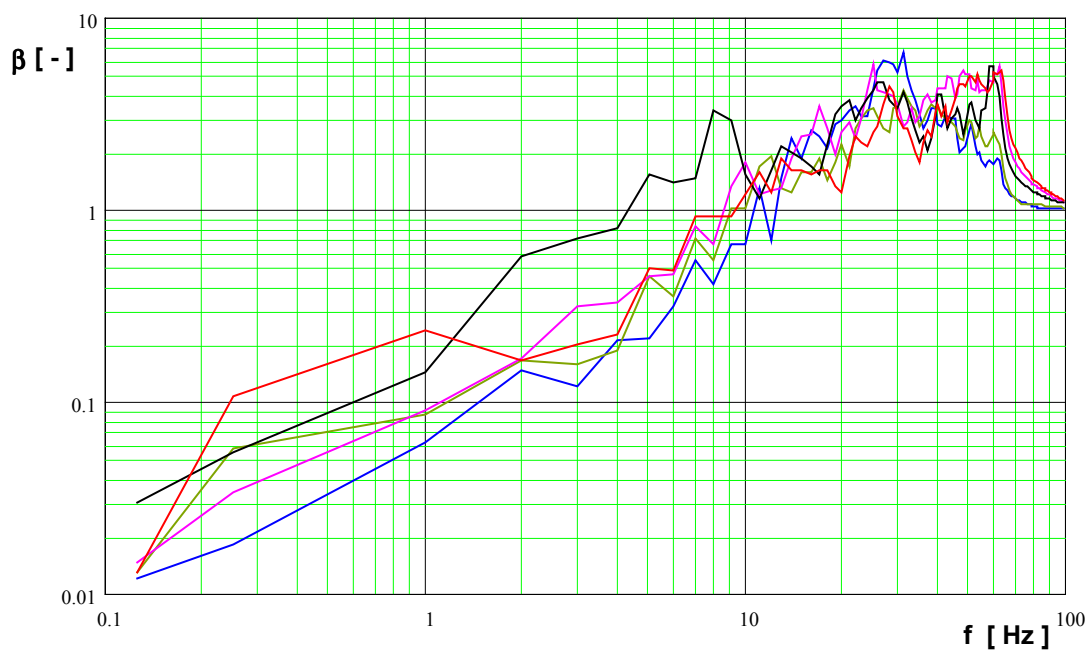
Nr pomiaru	Typ pojazdu oraz prędkość przejazdu [km/h]	Maksymalne przyspieszenie zarejestrowane w:		
		punkcie na gruncie (1 m od krawężnika) $A_{max}$ [cm/s <sup>2</sup> ]	punkcie na gruncie (4 m od krawężnika) $A_{max}$ [cm/s <sup>2</sup> ]	punkcie na budowli (5 m od krawężnika) $A_{max}$ [cm/s <sup>2</sup> ]
1	Autobus przegubowy ~ 20	2.17	x	1.28
2	Autobus przegubowy ~ 30	1.11	x	1.06
3	Sam. ciężar.- cysterna ~ 50	x	14.37	1.26
4	Sam. ciężar.- cysterna ~ 70	x	17.45	2.81
5	Autobus przegubowy ~ 40	x	3.17	0.81

Pomiary 1 i 2 przeprowadzono przy pierwszym ustawieniu czujników, pomiary 3,4 i 5 zaś – przy drugim ustawieniu czujników. Przebiegi drgań w czasie zarejestrowane podczas przejazdu pojazdów posłużyły do obliczenia przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. Uzyskane wykresy przedstawiono kolejno na rys. 3.2.3 - 3.2.5. Linie odpowiadają kolejnym pomiarom z tabelicy 3.2.1. Rzędne zostały odniesione do maksymalnych amplitud przyspieszeń zarejestrowanych w poszczególnych wibrogramach.

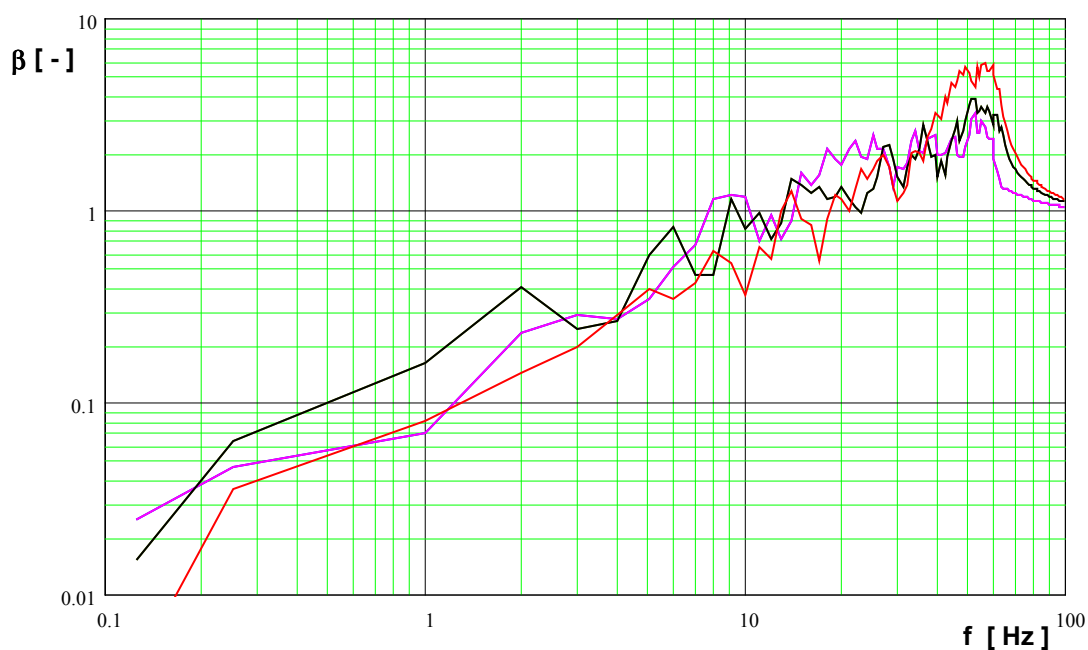
W tabelicy 3.2.2 zestawiono informacje odnoszące się do pomiarów wykonanych w przekroju 2.

**Tabela 3.2.2** Zestawienie informacji o przebiegach drgań poziomych prostopadłych do osi drogi zarejestrowanych w trakcie pomiarów w przekroju 2

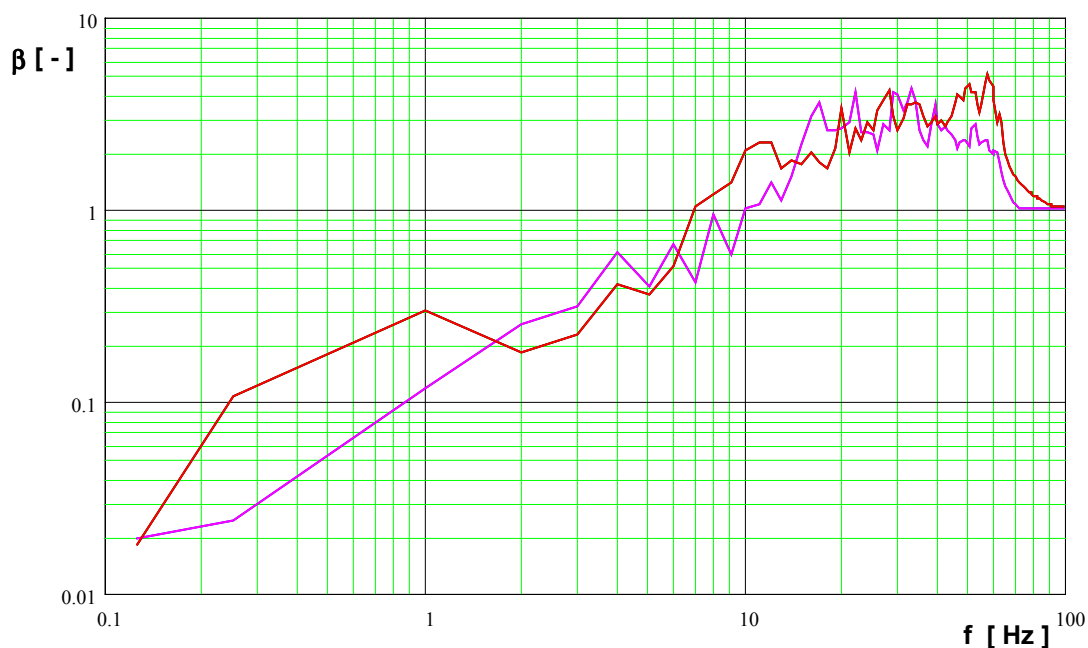
Nr pomiaru	Typ pojazdu oraz prędkość przejazdu [km/h]	Maksymalne przyspieszenie zarejestrowane w:	
		punkcie na krawężniku $A_{max}$ [cm/s <sup>2</sup> ]	punkcie na budowli (5.40 m od krawężnika) $A_{max}$ [cm/s <sup>2</sup> ]
1	Autobus ~ 30	8.96	1.44
2	Dwa dźwigi samoch. ~ 30	10.34	1.18
3	Star z przyczepą ~ 40	4.26	1.26



**Rys. 3.2.3** Wykresy spektrów odpowiedzi drgań drogowych w przekroju 1 w punkcie usytuowanym na budowli (5.00 m od krawędzi jezdni).

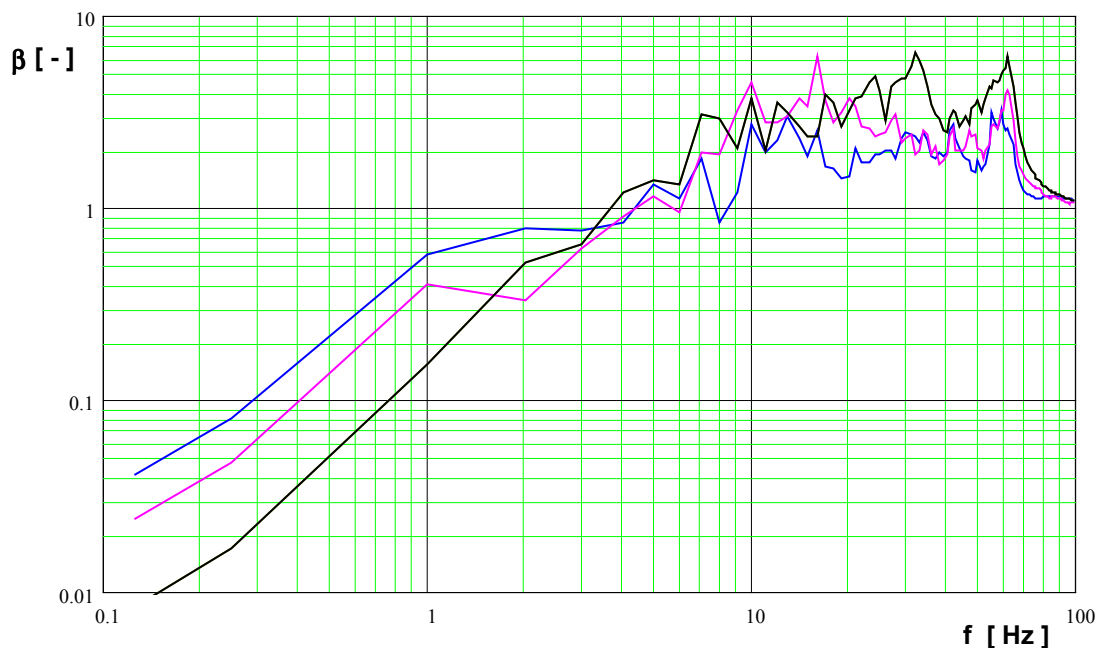


**Rys. 3.2.4** Wykresy spektrów odpowiedzi drgań drogowych w przekroju 1 w punkcie usytuowanym na gruncie (4.0 m od krawędzi jezdni).



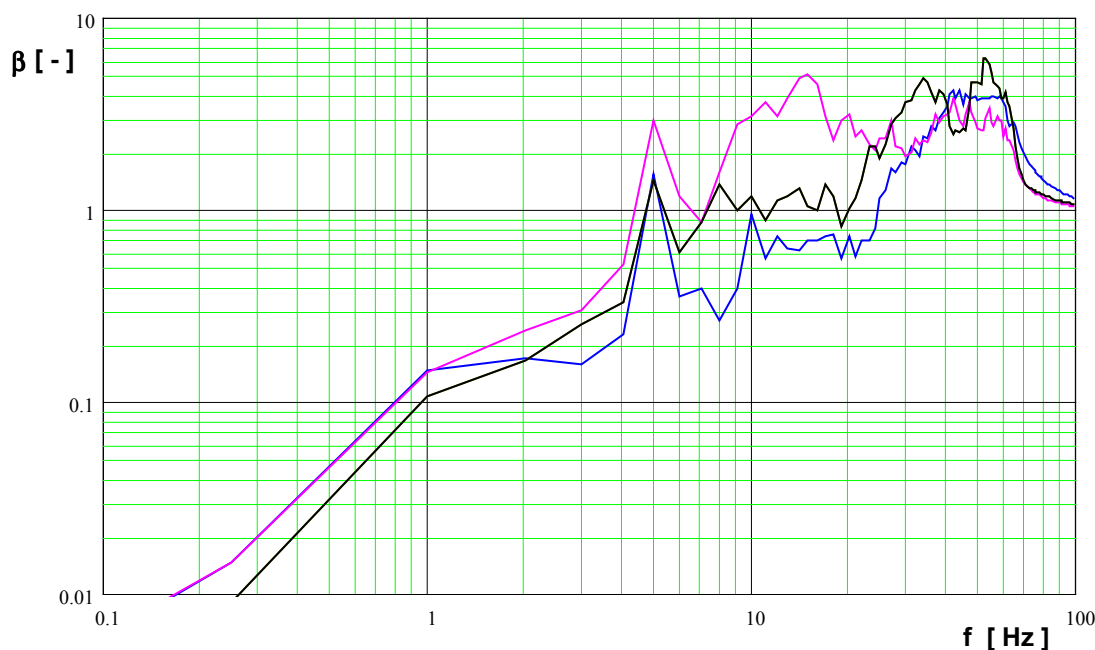
**Rys. 3.2.5** Wykresy spektrów odpowiedzi drgań drogowych w przekroju 1 w punkcie usytuowanym na gruncie (1.0 m od krawędzi jezdni).

Podczas badań w przekroju 2 rejestrowano drgania generowane przy normalnym ruchu drogowym. Przedstawione na rys. 3.2.6 spektra odpowiedzi dotyczą przejazdów przez przekrój ze zdegradowaną warstwą dywanika asfaltowego. Przyspieszenia drgań zarejestrowano na budowli. Przejazd przez nierówność, generuje znacznie większe drgania w obu badanych kierunkach (poziomy „x” i pionowy „z”). Widać to wyraźnie z porównania wykresów spektrów pokazanych na rys. 3.2.7 i 3.2.5 oraz odpowiednich wielkości  $A_{\max}$  zestawionych w tablicach 3.2.1 i 3.2.2.



**Rys. 3.2.6** Wykresy spektrów odpowiedzi drgań drogowych w przekroju 2 w punkcie usytuowanym na budowli (5.40 m od krawędzi jezdni).





**Rys. 3.2.7** Wykresy spektrów odpowiedzi drgań drogowych w przekroju 2 w punkcie usytuowanym na krawędzi jezdni.

Te oraz wiele innych wykresów spektrów wykorzystano w ocenie charakterystycznych cech kształtów wykresów w badanym przedziale częstotliwości. Na wykresach stwierdzono dobrą zgodność przebiegu linii spektralnych odpowiadających różnym rodzajom wymuszeń. Większość z nich układała się w stosunkowo wąskim paśmie. Z podanych tu wcześniej jedynie linia odpowiadająca przejazdowi z dużą prędkością (ok. 70 km/h) pojazdu testowego - pokazana na wykresie 3.2.3 jako linia czarna - odbiega znacznie od innych. W tym też pomiarze uzyskano największe maksymalne wartości przyspieszeń. Wykresy otrzymane z analizy drgań zarejestrowanych na obu budowlach mają podobny kształt, bez wyróżniania jakichś częstotliwości. Natomiast na wykresach spektralnych odpowiadających drganiom zarejestrowanym na krawężniku widać wyraźne wzmocnienie rzędnych przy częstotliwości ok. 5 Hz (por. rys. 3.2.7). Można przypuszczać, że zdegradowanie jezdni w tym przekroju pomiarowym może mieć związek z tym wzrostem.

### 3.3 Zestawienie najważniejszych czynników mających wpływ na intensywność generowanych drgań drogowych

Pojazdy drogowe jako złożone układy dynamiczne o wielu stopniach swobody podczas przejazdu generują drgania i przekazują je do otoczenia. Przenoszą się one zwykle przez powierzchnię styku (kontaktu) pomiędzy oponą a jezdnią. Dodatkowo poruszająca się masa pojazdu wywołuje osiadania (por. [10]), które rozprzestrzeniają się w okolicy jezdni powodując występowanie oscylacji podbudowy jezdni i gruntu. Prowadzi to do jego konsolidacji.

Na podstawie przeglądu literatury oraz przeprowadzonych wstępnie badań własnych w przypadku drgań komunikacyjnych można wyróżnić następujące czynniki kształtujące intensywność drgań generowanych przejazdem pojazdów i przekazywanych do otoczenia:

- a) rodzaj, typ oraz stan zachowania pojazdu wywołującego drgania, a w szczególności:
  - ⇒ wyważenie elementów pojazdu pustego oraz załadowanego,
  - ⇒ układ resorowania i amortyzatorów,
  - ⇒ sposób przekazywania drgań na styku koła z nawierzchnią,
  - ⇒ stan zachowania pojazdu, szczególnie układu resorowania i kół (stan techniczny, luzy łożyskowe, zużycie ogumienia i amortyzatorów, itp.),

- ⇒ liczba i rozstaw osi kół pojazdu,
- ⇒ kształt pojazdu (przy znacznych prędkościach).
- b) rodzaj i stan drogi, po którym porusza się pojazd, a w szczególności:
  - ⇒ rodzaj nawierzchni ,
  - ⇒ konstrukcja elementów przekazujących obciążenia na grunt (podbudowa, podsypka, itp.),
  - ⇒ sztywność pionowa i pozioma całej konstrukcji nawierzchni,
  - ⇒ rozwiązania konstrukcyjne w miejscach osobliwych (skrzyżowania, łuki itp.).
- c) sposób poruszania się pojazdu (prędkość, fazy ruchu, krzywizna toru jazdy itp.),
- d) rodzaj i stan podłoża, przez które propagowane są drgania (z uwzględnieniem infrastruktury podziemnej, szczelin w gruncie, uwarstwienia gruntu, konfiguracji terenu itp.),
- e) odległość i usytuowanie źródła drgań w stosunku do budowli odbierającej drgania,
- f) rodzaj i stan budowli odbierającej drgania, a w szczególności:
  - ⇒ typ budynku i jego geometria oraz cechy dynamiczne,
  - ⇒ sposób posadowienia,
  - ⇒ stan zachowania obiektu,
  - ⇒ interakcja budowli z podłożem.

W dalszym budowaniu modelu zjawiska przyjęto pewne założenia upraszczające. Wynikają one z kilku przesłanek. Przede wszystkim przyjęto, że wszystkie informacje dotyczące pojazdu (ad. a) zostaną przedstawione w formie przyporządkowania danemu pojazdowi jego klasy. Nie uwzględniono stanu technicznego oraz stopnia wypełnienia danego pojazdu. Zwykle wymaga to kosztownych i czasochłonnych badań ankietowych które, w czasie regularnego ruchu drogowego, nie były możliwe do przeprowadzenia. W odniesieniu do drogi (ad. b, d) przyjęto, iż pojazdy poruszają się po drodze o nawierzchni równej, bez uszkodzeń, pokrytej warstwą dywanika asfaltowego. Z uwagi na konstrukcję drogi oraz na uwarstwienie podłoża w otoczeniu tejże nie uwzględniano poszczególnych parametrów z tym związanych lecz określono badane przekroje jako niezależne typu A, B, C. Przyjęto także (ad. c), że pojazd porusza się ze stałą prędkością, po linii prostej, środkiem danego pasa ruchu bez uwzględnienia zmiany kierunku i toru jazdy na odcinku pomiarowym. Położeniu budowli w przekroju (ad. e) odpowiada odległość od krawędzi jezdni czujnika pomiarowego usytuowanego przy jej podstawie. Budynków istniejących w danych przekrojach (ad. f) nie charakteryzowano ich własnościami dynamicznymi.

## 4 Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (SSN)

### 4.1 SSN atrakcyjnym narzędziem współczesnego badacza

SSN odznaczają się własnościami pożądanymi w wielu praktycznych zastosowaniach (por.[64]). Mogą bowiem stanowić uniwersalny układ aproksymacyjny odwzorowujący wielowymiarowe zbiory danych, wyróżniają się zdolnością uczenia się i adaptacji do zmieniających się warunków zewnętrznych, dysponują w końcu zdolnością uogólniania nabytej wiedzy.

Współcześnie (por.[47]) zainteresowanie SSN zauważa się w różnych dyscyplinach naukowych. Szczególnie atrakcyjne jest to, iż SSN może być dostosowywane do rozwiązywania wybranego problemu w wyniku uczenia jej przy użyciu ciągów typowych pobudzeń i odpowiadających im pożądanym reakcji [81].

W przypadku zastosowania tradycyjnych metod komputerowych wymagane jest sprecyzowanie algorytmów i zapisanie ich w postaci programów obliczeniowych. Zastosowanie SSN możliwe jest tam, gdzie typowe użycie komputerów napotyka na trudności. Przede wszystkim SSN wykorzystuje się w zadaniach wymagających kojarzenia informacji (np. przy rozpoznawaniu obrazów, przetwarzaniu sygnałów w diagnostyce). Ważną zaletą SSN jest także znaczące skrócenie czasu obliczeń. W wielu wypadkach obliczenia sekwencyjne wydłużają czas obliczeń, zastosowanie zaś komputerowych symulatorów sieci pozwala niejednokrotnie znacznie ten czas skrócić.

SSN, podobnie jak ich nerwowy pierwowzór czyli neuronowe układy biologiczne, charakteryzują się dużą odpornością na uszkodzenia, możliwością równoległego przetwarzania informacji, niejednokrotnie obciążonej szumem i rozmytej, a także minimalnym zużyciem energii. Wszystko to powoduje, że SSN stają się narzędziem atrakcyjnym, ciekawym i godnym zainteresowania współczesnego badacza.

### 4.2 SSN jako narzędzie przydatne w kształtowaniu modeli

#### 4.2.1 Podstawy biologiczne

Podstawowa komórka nerwowa zwana jest neuronem. Schemat takiego biologicznego neuronu przedstawiono za [71] na rys.4.2.1. Rozróżnia się w niej trzy główne elementy: ciało somatyczne komórki, dendryty i akson. Dendryty tworzą gęsto rozgałęzioną pajęczynę cienkich włókien wokół ciała neuronu. Za pomocą aksonów informacja w formie impulsów elektrycznych dociera od neuronu do dendrytów neuronu sąsiedniego. Aksony są długimi cylindrycznymi włóknami spełniającymi zadania linii transmisji. Pomiedzy nimi a dendrytami impulsy przenoszone są za pomocą złączy zwanych synapsami. Impuls w neuronie rzeczywistym jest przekazywany w sposób neurochemiczny. Każdorazowo neuron reaguje stosownie do sumy pobudzeń otrzymanych od otoczenia. Następuje to w chwili, gdy potencjał jego błony komórkowej osiąga określoną wielkość progową. Wszelkie impulsy mogą działać na neuron pobudzająco bądź hamująco.

#### 4.2.2 Model sztucznego neuronu

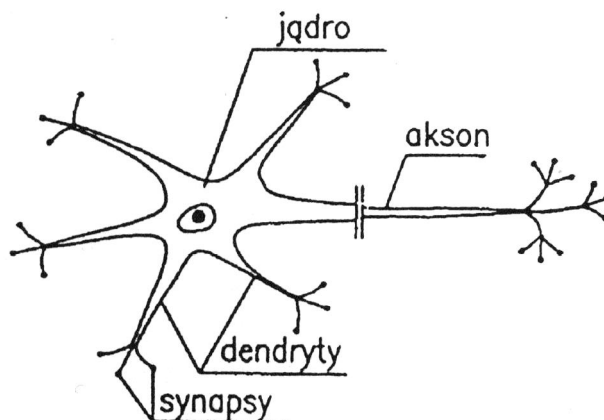
Twórcy pierwszego modelu sztucznego neuronu [59] przedstawili go w postaci uproszczonej komórki złożonej z ciągu aktywnych wejść, sumatora i jednego wyjścia. Schemat przedstawiono tu na rys. 4.2.2. Regułę aktywacji można zapisać w postaci:

$$y^{k+1} = \begin{cases} 1 & \text{gdy } \sum_i w_i x_i^k \geq T_0 \\ 0 & \text{gdy } \sum_i w_i x_i^k < T_0 \end{cases} \quad (4.2.1)$$

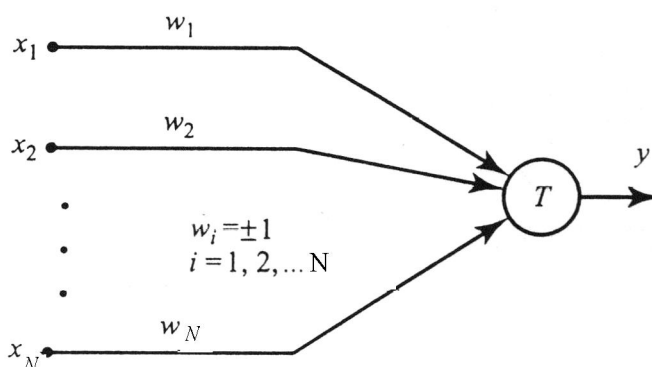
gdzie:

$k = 0, 1, \dots$  oznacza kolejne momenty czasowe,  $w_i$  jest wagą połączenia wejścia z błoną neuronu (pomiędzy chwilami  $k$  i  $k+1$  upływa jednostkowy czas opóźnienia).

Tak zbudowany neuron dopuszcza jedynie wystąpienie binarnych stanów (0 lub 1), zakłada dyskretny opis czasu i synchronizm działania wszystkich neuronów w sieci (tzn. wagi i progi pozostają tu niezmiennie i nie występuje interakcja między neuronami w sieci oprócz przepływu sygnału).



Rys. 4.2.1 Schemat biologicznego neuronu przedstawiony za [71].



Rys. 4.2.2 Model sztucznego neuronu za [59].

W zmodyfikowanym modelu neuronu (rys. 4.2.3) wprowadzono jednostkę przetwarzającą, w której „ $w$ ” jest wektorem wag zdefiniowanym wzorem:

$$\underline{w} = [w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_N]^T$$

„ $x$ ” zaś wektorem wejść:

$$\underline{x} = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N]^T$$

$b$  - jest jednostką progową, (tzw. bias):

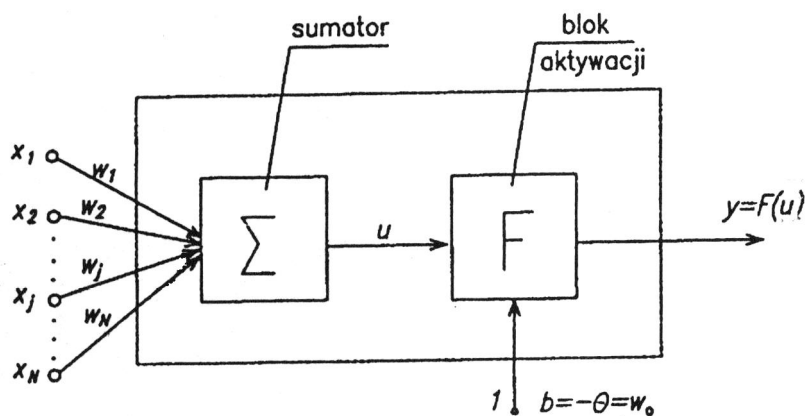
$$b = w_0 = -\Theta$$

Jeżeli neuron posiada  $n$  połączeń to bias będzie  $(N+1)$  "zerowym" połączeniem. Wprowadza się wielkość potencjału neuronu jako:

$$u = \varphi + b = \sum_{i=1}^n w_i x_i^k - \Theta = \sum_{i=0}^n w_i x_i^k \quad (4.2.2)$$

$y = F(u)$  zaś jest funkcją aktywacji neuronu.

Neuron po operacji ważonego sumowania potencjału "u" przechodzi do nieliniowej operacji  $F(u)$  w zgodzie ze swoją funkcją aktywacji.

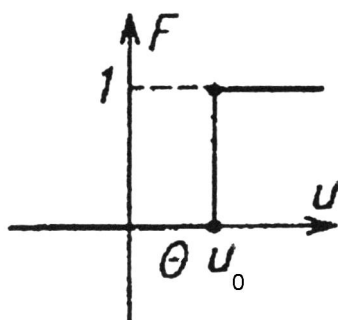


Rys. 4.2.3 Zmodyfikowany model sztucznego neuronu.

Kluczową rolę wypełnia funkcja aktywacji. Wprowadzono różne jej postacie. Najczęściej stosowane są funkcje aktywacji:

- unipolarna (binarna) - rys. 4.2.4:

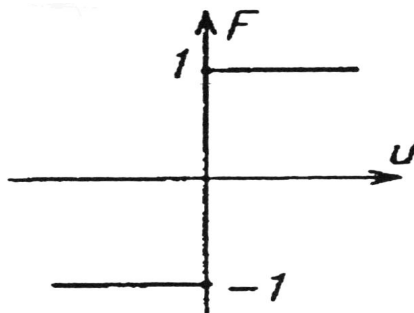
$$F(u) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } u \geq u_0 \\ 0 & \text{gdy } u < u_0 \end{cases} \quad (4.2.3)$$



Rys. 4.2.4 Unipolarna (binarna) funkcja aktywacji.

- bipolarna (signum) - rys. 4.2.5:

$$F(u) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } u \geq 0 \\ -1 & \text{gdy } u < 0 \end{cases} \quad (4.2.4)$$

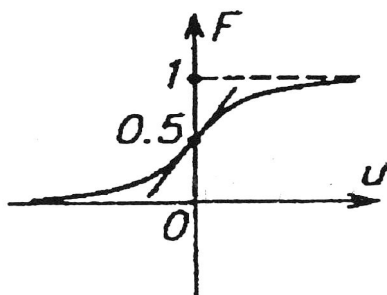


Rys. 4.2.5 Bipolarna funkcja aktywacji.

- sigmoidalna - rys.4.2.6:

$$F(u) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta_1 u)} \quad (4.2.5)$$

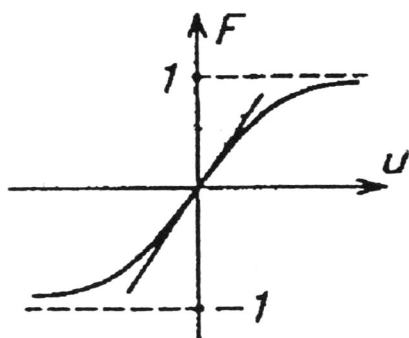
gdzie:  $\beta_1$  - parametr;



Rys. 4.2.6 Sigmoidalna funkcja aktywacji.

- sigmoidalna bipolarna - rys.4.2.7:

$$F(u) = \frac{1 - \exp(-\beta_1 u)}{1 + \exp(-\beta_1 u)} \quad (4.2.6)$$



Rys. 4.2.7 Sigmoidalna bipolarna funkcja aktywacji.

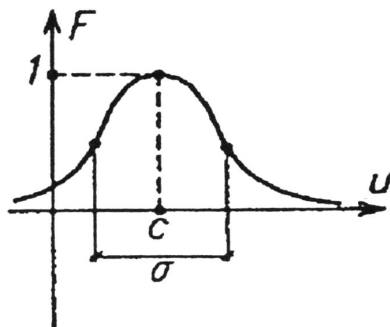
- liniowa:

$$F(u) = bu \quad \text{gdzy } b > 0 \quad (4.2.7)$$

Stosowane są również inne funkcje aktywacji jak np. funkcja Gaussa ( i jej podobne) rys. 4.2.8:

$$F(u) = \exp\left(-\frac{(u-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.2.8)$$

gdzie:  $\sigma$  - parametr (podstawa sieci radialnych),

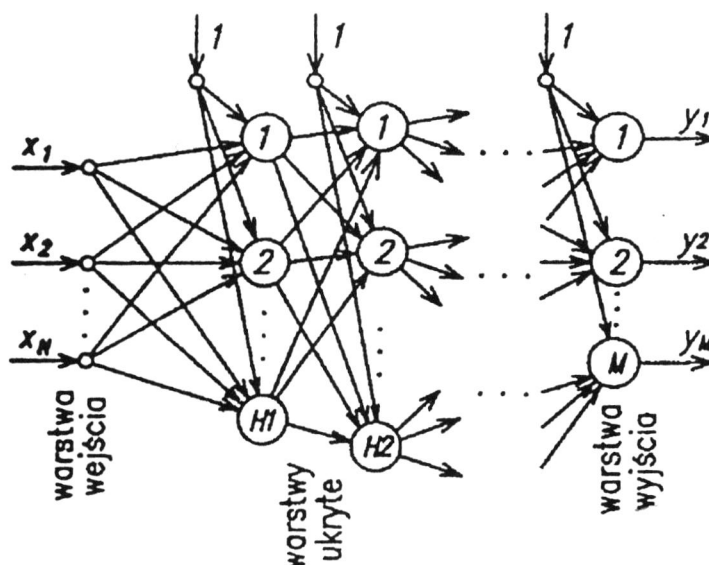


Rys. 4.2.8 Radialna funkcja bazowa.

oraz funkcja Hardy'ego [64], funkcje falkowe (wavelet-y) [27], itp.

### 4.2.3 Budowa SSN i proces ich nauczania

Zbiór pojedynczych neuronów tworzy tzw. warstwę sieci (ang. layer). Warstwę tworzą: wektor wejścia, wektor wyjścia i warstwy pośrednie (tzw. warstwy ukryte). Jeżeli wektor wejścia zostanie połączony z warstwą pośrednią i z wektorem wyjścia, to powstanie sztuczna sieć neuronowa jednokierunkowa. Przykładową sieć podano na rys. 4.2.9.

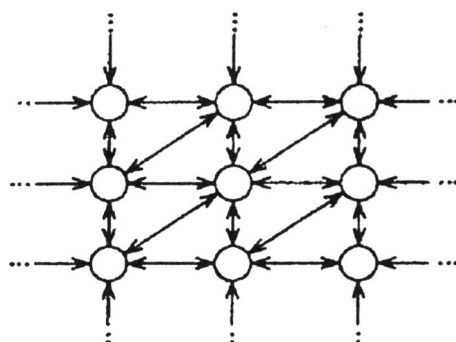


Rys. 4.2.9 Przykład sztucznej sieci neuronowej.

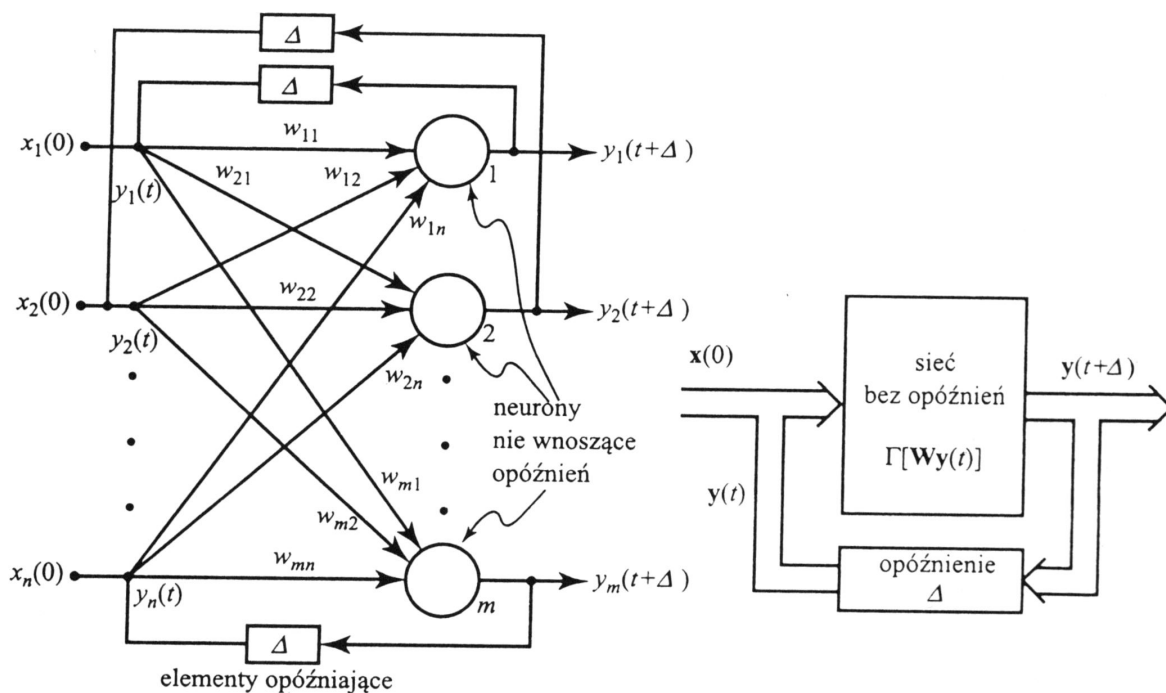
Potencjał dowolnego neuronu w tak zbudowanej sieci zapisuje się w postaci:

$$u_i = \sum_{k=0}^n w_i x_i^k \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4.2.9)$$

Połączenie ze sobą kilku warstw neuronów daje sieć wielowarstwową odwzorowującą wektor wejścia w wektor wyjścia. Rozmiary wektorów wejścia i wyjścia mogą być różne, w zależności od liczby przyjętych parametrów. W przypadku połączenia neuronów między sobą powstanie sieć komórkowa (por. [38]), którą przedstawiono tu na rys. 4.2.10. Połączenie zaś warstw między sobą stanowi sieć rekurencyjną podaną na rys. 4.2.11.

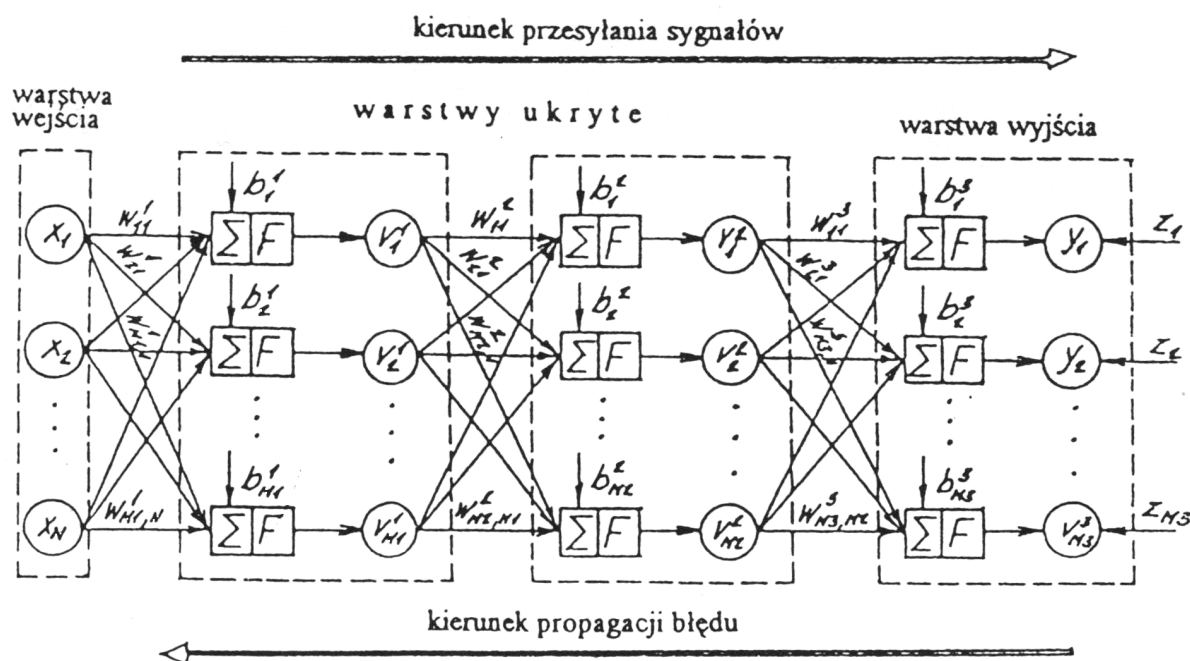


Rys. 4.2.10 Sztuczna sieć neuronowa komórkowa.



Rys. 4.2.11 Sztuczna sieć neuronowa rekurencyjna.

W niniejszej pracy stosowane będą sieci neuronowe jednokierunkowe, uczone w sposób nadzorowany ze wsteczną propagacją błędu. Są one najczęściej stosowane w zagadnieniach inżynierskich (por. [77]). Przykład takiej sieci podano tu na rys. 4.2.12.



Rys. 4.2.12 SSN jednokierunkowa, uczone w sposób nadzorowany, ze wsteczną propagacją błędu.

Niech w zbiorze danych określony będzie zbiór wejściowy:

$$\underline{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N\}$$

oraz odpowiadający mu zbiór wyjść:

$$\underline{Z} = \{z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_M\}$$

Błąd wyjścia odpowiadający i-temu parametrowi wektora wyjścia z sieci  $\underline{y}$  można zapisać jako:



$$\delta_i = z_i - y_i \quad (4.2.10)$$

Jeżeli normę błędu

$$E = \|z^{(p)} - y^{(p)}\| \quad (4.2.11)$$

przyjmię się w postaci błędu średniokwadratowego odpowiadającego pojedynczemu wzorcowi:

$$E = \frac{1}{2} \sum_i (z_i^{(p)} - y_i^{(p)})^2 \quad (4.2.12)$$

to błąd odpowiadający wszystkim neuronom wyjściowym po prezentacji wszystkich K wzorców, będzie wynosić:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^K \sum_{i=1}^n (z_i^{(p)} - y_i^{(p)})^2 \quad (4.2.13)$$

Błąd średni uzyskuje się ze wzoru:

$$E_{MSE} = \frac{1}{K} E \quad (4.2.14)$$

Jeżeli zbiór wzorców zostanie podzielony na podzbiory: uczący, testujący i walidujący, to można określić oddzielnie wartość błędu średniego odpowiadającego każdemu ze zbiorów. Podział na podzbiory można wykonać arbitralnie albo losowo.

W procesie uczenia sieci metodą wstecznej propagacji istotną rolę spełnia wybór podzbioru uczącego. Najczęściej wyboru podzbioru uczącego dokonuje się dobierając próbki:

- w sposób rotacyjny, sekwencyjnie,
- losowo.

Podczas uczenia sieci następuje proces dostrajania wag kolejnych wzorców w danym kroku iteracji:

$$w_{ji}(s+1) = w_{ji}(s) + \Delta w_{ji}(s) \quad (4.2.15)$$

gdzie  $s$  - numer kroku iteracji oraz  $i, j = 0, 1, \dots, N$

Poszukując minimum funkcji błędu  $E$  (zależnej od parametrów wagowych) należy spełnić w gradientowej metodzie największego spadku warunek konieczny minimum lokalnego:

$$\left( \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} \right)_s = 0 \quad (4.2.16)$$

tzn. uzyskać zerowanie się pochodnych cząstkowych w kolejnych krokach iteracji.

Zatem:

$$\Delta w_{ji} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = -\eta \sum_{p=1}^K \frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} = -\eta \sum_{p=1}^K \frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} \frac{\partial z_j^{(p)}}{\partial w_{ji}} \quad (4.2.17)$$

gdzie  $\eta$  - parametr uczenia.

W przypadku liniowych elementów przetwarzających zachodzą zależności:

$$\frac{\partial E_p}{\partial z_j^{(p)}} = -\left( z_j^{(p)} - y_j^{(p)} \right) = -\delta_j^{(p)} \quad (4.2.18)$$

$$\frac{\partial z_j^{(p)}}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial y_j^{(p)}}{\partial w_{ji}} = x_i \quad (4.2.19)$$

i stąd

$$\Delta w_{ji} = \eta \sum_{p=1}^K \delta_j^{(p)} x_i \quad (4.2.20)$$

Stosuje się też zmiany wag po każdej prezentacji wzorca wg zależności:

$$\Delta w_{ji} = \eta \delta_j^{(p)} x_i^{(p)} \quad (4.2.21)$$

Ułatwia to tworzenie algorytmu a jednocześnie - wobec małego parametru uczenia  $\eta$  - różnice w wartościach uzyskanych wg (4.2.21) są zaniedbywalnie małe w stosunku do

wartości wg (4.1.20).

Przedstawiona tu reguła uczenia jest nazywana regułą delty Werbosa. Wadą tej metody jest jej wolna, nie zawsze gwarantowana, zbieżność. Może bowiem wystąpić rozbieżność. Zależy to od przyjętych parametrów początkowych sieci oraz doboru parametru uczenia  $\eta$  (por. np.[30]).

Modyfikacją metody gradientowej największego spadku jest wprowadzenie członu momentum (ang. momentum term) zgodnie ze wzorem:

$$\Delta w_{ji} = -\eta \frac{\partial E(s)}{\partial w_{ji}} + \alpha \Delta w_{ji}(s-1) \quad (4.2.22)$$

gdzie  $\alpha$  - człon momentum. Takie przyjęcie pozwala na eliminację możliwości utknięcia podczas obliczeń w minimum lokalnym.

Występują też modyfikacje obu wymienionych metod polegające na wprowadzeniu dynamicznej zmiany współczynników  $\eta$  i  $\alpha$ , czyli wprowadzeniu adaptacyjnego członu momentum (por. [30], [57]) albo zastosowaniu algorytmu Quickprop.

Opracowane są również inne metody bardziej zaawansowanego nauczania SSN. Można wymienić tu metody quasinewtonowskie, gradientów sprzężonych oraz metody heurystyczne (jak wspomniany już algorytm Quickprop czy Rprop), w którym uwzględnia się w uczeniu znak gradientu (por. [64]).

### 4.3 SSN w układach dynamicznych - wybrane aplikacje

W [65] podjęto próbę klasyfikacji zastosowania SSN do rozwiązywania problemów dotyczących układów mechanicznych. Najważniejsze zestawiono tu w tabelicy 4.3.1.

**Tabela 4.3.1** Problemy do rozwiązywania których stosuje się SSN (wg [65]).

Problem	Wejście	Wyjście
Symulacja odpowiedzi układu mechanicznego (UM)	Wymuszenie i cechy UM	Odpowiedzi UM
Symulacja wymuszenia	Odpowiedzi i cechy UM	Wymuszenie UM
Identyfikacja cech UM	Wymuszenie i odpowiedź UM	Cechy UM
Ocena stanu wymuszenia, odpowiedniki lub cechy UM	Wszystkie lub wybrane wymuszenia, odpowiedzi i cechy UM	Miary oceny

W pracy przeglądowej [77] podano kilka rodzajów zastosowań SSN ze wsteczną propagacją błędu w mechanice. Szczególną uwagę zwrócono na zastosowania przy rozwiązywaniu zagadnień dynamicznych.

W [55] opisano procedurę neuronową użytą w identyfikacji nieliniowego układu dynamicznego o jednym stopniu swobody. Procedura polegała na identyfikacji siły zwrotnej przy znanych wartościach przyspieszeń i przemieszczeń układu w odniesieniu do siły zwrotnej oscylatora Duffinga. Zastosowano wymuszenie o stałej amplitudzie a zmiennym okresie (sine-swept) rozważając równanie ruchu oscylatora Duffinga:

$$m \ddot{y} + g(y, \dot{y}) = u(t) \quad (4.3.1)$$

w którym:

$$g(y, \dot{y}) = u(t) - m \ddot{y}(t) \quad (4.3.2)$$

$$g(y, \dot{y}) = ay + by^3 + c \dot{y} \quad (4.3.3)$$

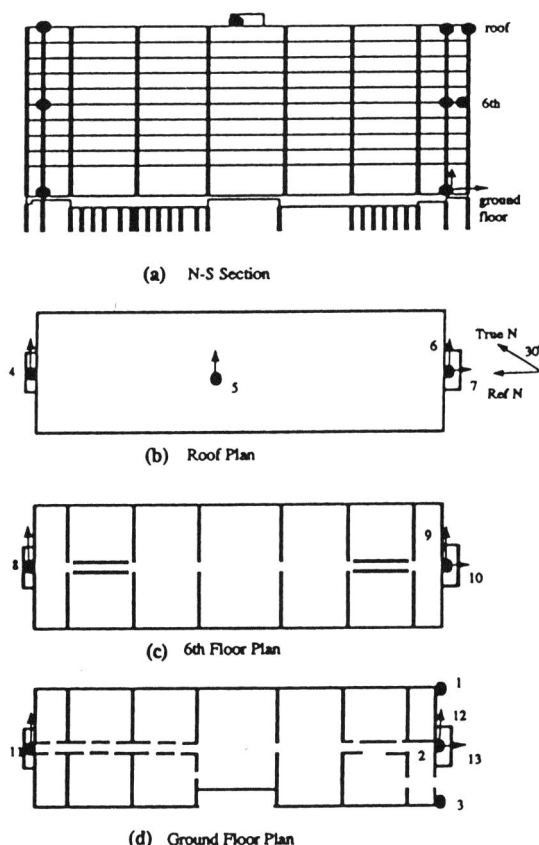
oraz przyjęto  $m = 1$ ,  $a = 2\pi$ ,  $b = 10$ ,  $c = 1.25$ .

Do SSN o wstecznej propagacji błędu wprowadzono przemieszczenia i prędkości jako

wielkości wejścia oraz siłę jako wielkość wyjściową. Wielkości te wprowadzono dyskretyzując przedział czasowy wymuszenia i stosując normalizację danych do przedziału  $(-1, 1)$ . Po nauczaniu (wytrenowaniu) SSN o topologii 2-15-10-1<sup>1</sup> posłużyła jako identyfikator procedury numerycznego całkowania równań ruchu o strukturze (4.3.1) przy różnych typach wymuszeń (tak zawartych w przedziale uczącym sieć jak i ekstrapolowanych poza tym przedziałem). Należy dodać, że sieć testowano (walidowano) wzbudzeniami stochastycznymi. SSN nauczana przy użyciu różnych parametrów  $\eta$  okazała się dobrym aproksymatorem. W przypadku wielkości ekstrapolowanych wyniki uległy pogorszeniu. Przy znacznej sile wzbudzenia sieć nie była w stanie wygenerować odpowiednich wielkości odpowiedzi.

Inny przykład zastosowania sztucznych sieci neuronowych przedstawiono w pracy [74]. Dotyczy on inżynierii sejsmicznej. SSN wykorzystano do przewidywania amplitudy trzęsienia ziemi na podstawie wcześniej zarejestrowanych wielkości z trzech wstrząsów w rejonie zatoki San Francisco. Wstrząsy charakteryzowały się zbliżonymi wartościami magnitudy (od 6.2 do 7.2). Stosowano sieć o wstecznej propagacji błędów z 4 neuronami wejściowymi, 10 neuronami w warstwie ukrytej i 1 neuronem wyjścia. Dane wprowadzone do SSN zawierały informacje ze 133 stacji monitorujących wstrząsy w promieniu 150 km od epicentrow. W zbiorze danych były:

- wielkość wstrząsu (magnituda),
- minimalna odległość od miejsca przerwania warstwy powierzchniowej do miejsca rejestracji,
- kąt pomiędzy prostą łączącą punkt pomiaru z epicentrum a poziomem,
- warunki geologiczne (skała, twardy i miękki grunt, nadkłady) w miejscu rejestracji.



Rys. 4.3.1 Budynek analizowany w [4] i układ zainstalowanych czujników.

Na wyjściu sieci określano intensywność w miejscu rejestracji. Początkowe wagi sieci

<sup>1</sup> kolejne numery oznaczają liczbę neuronów w poszczególnych warstwach

przyjmowano losowo i uczono SSN na zbiorze wybranym losowo. Tak nauczonej sieci użyto jako aproksymatora zasięgu wstrząsu przy założonych warunkach wstępnych.

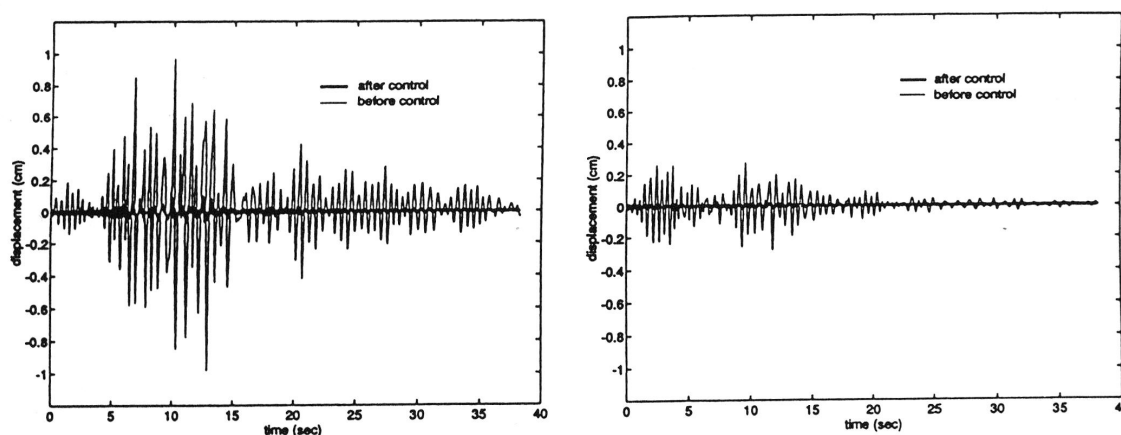
Kolejne publikacje dotyczyły modelowania uszkodzeń i tworzenia sterowników neuronowych (tzw. neurokontrolerów) w zastosowaniu do modeli analizowanych na stołach wstrząsowych [24, 25] oraz [23]. Celem tych prac było zbudowanie takich neurokontrolerów, które można stosować w układach mechanicznych do redukcji odpowiedzi dynamicznej konstrukcji.

W [20] wykorzystano informacje uzyskane zarówno z eksperymentu na stole wibracyjnym, jak i modelowania za pomocą metody elementów skończonych. Badano uszkodzenia wynikające z zastosowanego wymuszenia dynamicznego konstrukcji i porównano z uzyskanymi za pomocą „wytrenowanej” SSN.

W [4] analizowano możliwość zastosowania neurokontrolera w budynku, w którym zarejestrowano przebiegi trzęsień ziemi w punktach jak na rys. 4.3.1. Następnie zbudowano sieć neuronową, którą wytrenowano za pomocą wielkości zapisanych w przebiegu czasowym wymuszenia. Zastosowano dwa rodzaje sieci: emulator służący jako model konstrukcji, wytrenowany zgodnie z danymi doświadczalnymi oraz sieć aktywną do generowania informacji kontrolnych. Rys. 4.3.2 pokazuje różnice w przemieszczeniach przed i po zastosowaniu kontrolera.

Rozwiązanie podobnego zadania przedstawiono w [29]. Do budowania neurokontrolera zastosowano sieć rekurencyjną (self-reccurent neural network) podaną na rys.4.3.3.

Często na terenach sejsmicznych należy posłużyć się metodą całkowania bezpośredniego (ang. time history analysis) w celu poprawnego obliczenia sił występujących w budynkach (zwykle wysokich), które należy projektować na wpływy wynikające z ruchu podłoża. W pracy [5] przedstawiono wyniki analizy wpływów sejsmicznych na budowlę. Siły poziome powstałe w budowlu obliczone były metodą spektrum odpowiedzi z wykorzystaniem spektrum wzorcowego (linia ciągła na rys. 4.3.4) a także korzystając z wygenerowanego przebiegu przyspieszeń drgań gruntu (rys. 4.3.5), poprzez całkowanie bezpośrednie równania ruchu. Spektrum odpowiedzi takiego przebiegu nie różniło się zbytnio od wzorcowego (podana na rys. 4.3.4 - linia przerywana).



Rys. 4.3.2 Różnice przemieszczeń budynku w wybranych punktach przed i po zastosowaniu neurokontrolera za [4].

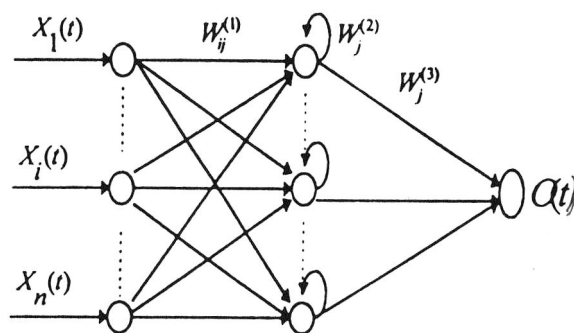
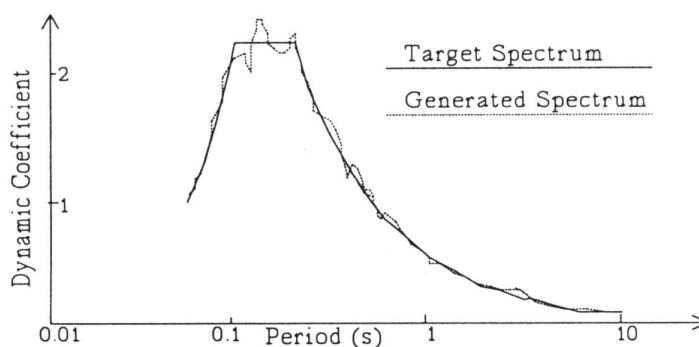


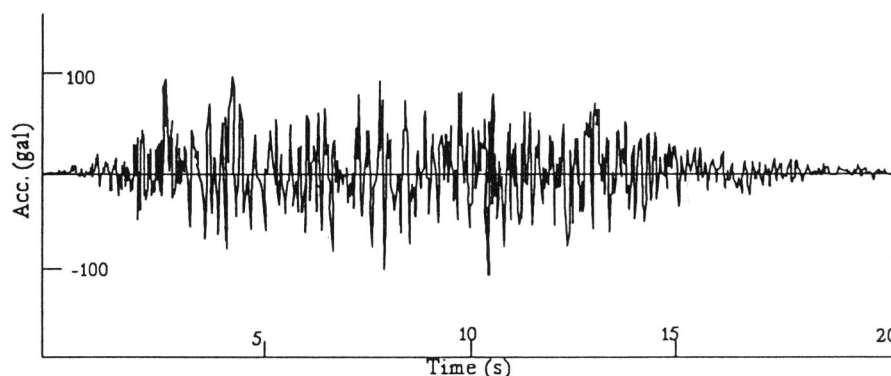
Figure 1. Self-recurrent neural network architecture

**Rys. 4.3.3** Sieć neuronowa zastosowana w analizie w [29].

Wyniki analizy zaś różniły się znacząco. Bywa, że uproszczone analizy nie dają dokładnych rezultatów w przypadku konstrukcji o wysokim poziomie niezawodności (np. wysokich budynków, konstrukcji elektrowni nuklearnych czy wież lub masztów). Zdecydowano się więc ująć w [5] bardziej kompleksowo problemy inżynierii sejsmicznej i dynamiki konstrukcji budynków od 5 do 30 kondygnacji (rozpatrywanych w 3 klasach, w zależności od typu konstrukcji). W [5] zwrócono szczególną uwagę na charakterystykę częstotliwościową takich konstrukcji. Stosując SSN ze wsteczną propagacją błędów, trójwarstwową, wprowadzono w warstwie wejściowej 20 neuronów charakteryzujących spektrum odpowiedzi o 2% ułamku tłumienia krytycznego i 5 neuronów opisujących podstawowe okresy własne budynków. SSN miała na podstawie normowych spektrów z [88] (zależnych od m.in. rodzaju podłoża) klasyfikować właściwe przebiegi czasowe. Taka sieć nie dawała poprawnych rezultatów. Po uwzględnieniu charakterystyk dynamicznych konstrukcji w nowej SSN, klasyfikowała ona prawidłowo 86% przypadków testowych i aż 95% przypadków uczących.

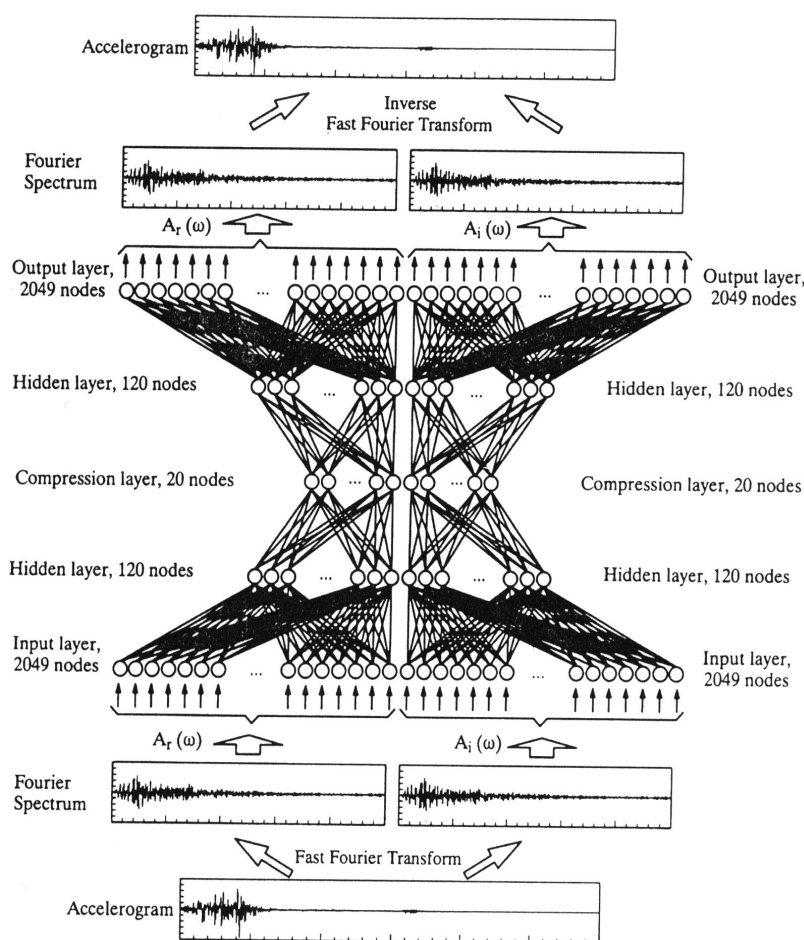


**Rys. 4.3.4** Spektra odpowiedzi stosowane w analizie przedstawionej w [5].

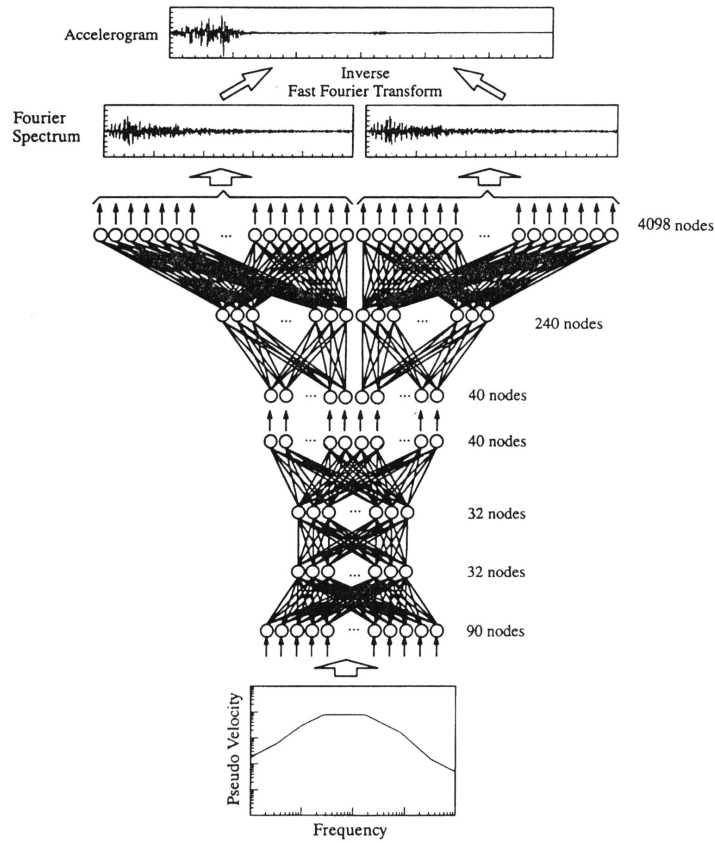


**Rys. 4.3.5** Przebieg wygenerowany odpowiadający spektrum odpowiedzi podanemu linią przerywaną na rys. 4.3.4 za [5].

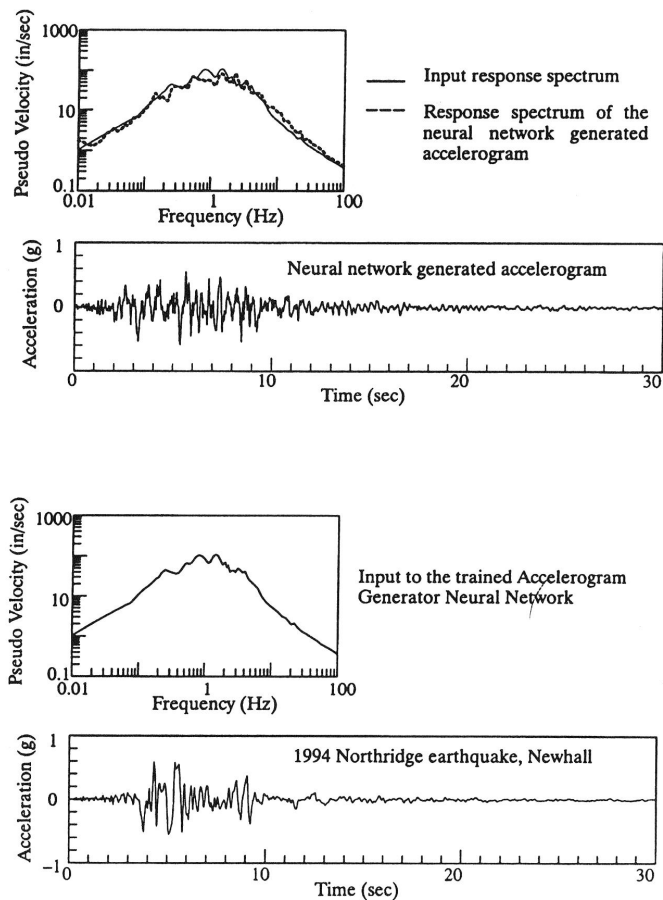
W [26] również opisano zastosowanie SSN do generowania akcelerogramów wstrząsów sejsmicznych. Zaproponowano najpierw sieć zdolną do odtworzenia akcelerogramu wprowadzonego do niej w formie dyskretnej. Na rys. 4.3.6 przedstawiono architekturę takiej sieci. SSN podzielona była na dwie części. W pierwszej zastosowano w nauczaniu składową rzeczywistą transformaty Fouriera sygnału (FFT), a w drugiej - składową urojoną. Każda część sieci została zbudowana z pięciu warstw symetrycznie wg topologii 2049-120-20-120-2049. Zbiór treningowy stanowiły przebiegi czasowe przyspieszeń odpowiadające 30 trzęsieniom ziemi o magnitudach od 5.7 do 7.0. Akcelerogramy znormalizowano w odniesieniu do wartości przyspieszenia ziemskiego (g). Nauczona sieć dobrze odwzorowywała wprowadzone przebiegi drgań. W dalszej kolejności przyjęto, iż warstwy pośrednie sieci tworzą dwie podsieci (o topologii 2049-120-20); dotyczące składowej rzeczywistej i urojonej transformaty Fouriera. Na tej podstawie, przy zachowaniu topologii górnej części sieci - 2 x (20-120-2049), zastąpiono część dolną topologią 90-32-32-40, w której wielkości wejściowe stanowiły rzędne prędkościowego spektrum odpowiedzi odpowiadające akcelerogramom uczącym poprzednią SSN. W ten sposób dokonano znaczącej kompresji danych. Nową architekturę przedstawiono na rys. 4.3.7.



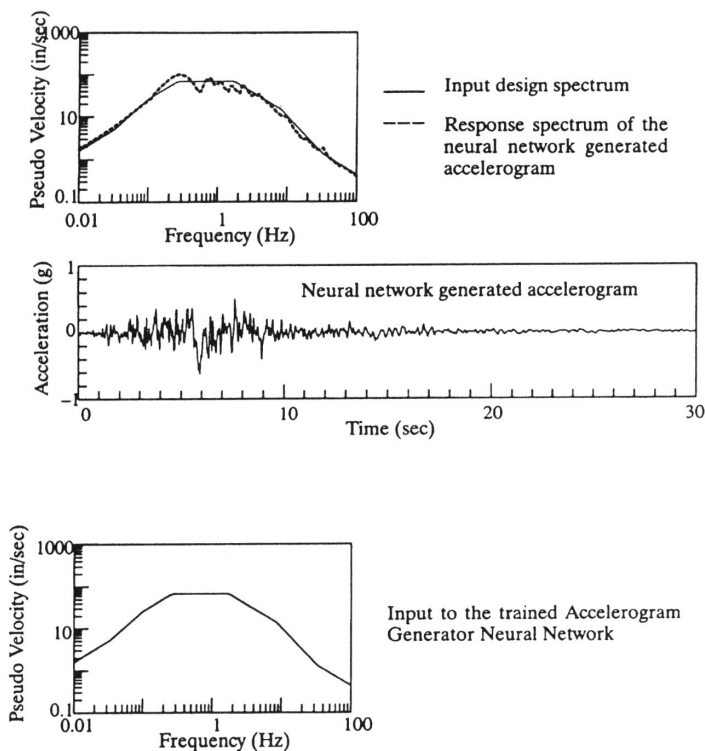
Rys. 4.3.6 Architektura sieci zdolnej do odtwarzania przebiegów drgań z [26]



Rys. 4.3.7 Architektura sieci zdolnej do odtwarzania przebiegów drgań, po zastosowaniu spektrów odpowiedzi z [26].



Rys. 4.3.8 Generowanie akcelegramów przez SSN na podstawie spektrów odpowiedzi ze znanych przebiegów za [26].



Rys. 4.3.9 Generowanie akcelegramów przez SSN na podstawie wzorcowych spektrów za [26].

Po przetrenowaniu nowej sieci testowano ją z użyciem spektrów uzyskanych przy innych wstrząsach. Porównano wyniki odpowiadające spektrum rzeczywistym z uzyskanymi przy uwzględnieniu nowych przebiegów przyspieszeń (rys. 4.3.8). W końcu wprowadzono do sieci projektowane spektrum odpowiedzi i otrzymano z symulatora odpowiedni akcelerogram (por. rys. 4.3.9). Dodatkową zaletą takiej SSN, oprócz znacznej kompresji danych, może być wykorzystanie znanych spektrów odpowiedzi do analiz metodą całkowania bezpośredniego i generowanie na ich podstawie odpowiednich przebiegów czasowych.

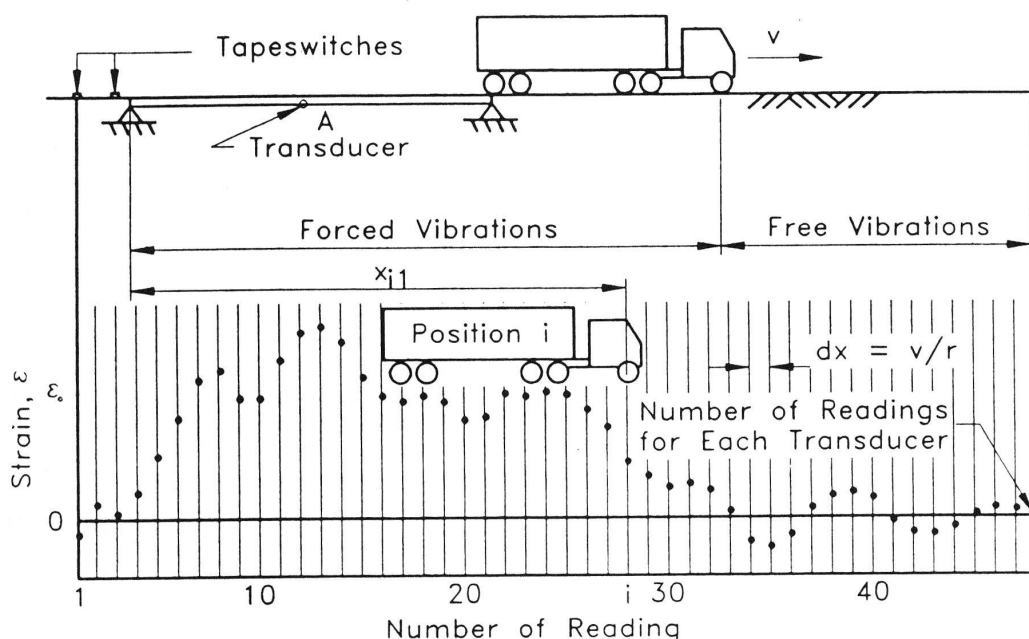
#### 4.4 Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w rozwiązywaniu problemów inżynierii drogowej

W zagadnieniach inżynierii drogowej SSN stosuje się do rozwiązywania zagadnień wieloparametrycznych. Często należy uwzględniać parametry dotyczące (por. [66]) interakcji geometrii skrzyżowań o odpowiedniej strukturze (ze znakami lub bez, z sygnalizacją lub bez) ruchu w obrębie badanych węzłów drogowych, czynników środowiskowych, meteorologicznych (por. [19]), ekologicznych a nawet społecznych.

I tak w [66] analizowano skrzyżowania ze znakiem „stop”, położone w obszarach wiejskich Ohio. Zadanie polegało na określeniu tzw. czasu krytycznego (critical gap) potrzebnego do przejechania przez drogę główną podczas ruchu pojazdów w kierunku nadrzędnym, przy dopuszczalnej prędkości 55 mil/h na tego typu drogach o dwóch pasach ruchu. Spośród wielu informacji zarejestrowanych podczas prowadzonych pomiarów (zarówno w dzień, jak i w nocy z użyciem 6 kamer) wybrano te, które dotyczyły zarówno prędkości pojazdów na wlotach głównych, oraz na wlotach podporządkowanych, jak i możliwości manewru (skrętu). Część z nich zakodowano w formie binarnej. W sieci było 17 wejść. Jako wielkości wyjściowe wprowadzono dwa neurony (akceptowanie bądź niezaakceptowanie warunków zewnętrznych). Sieć neuronowa użyta do badań była siecią o wstecznej propagacji błędu i miała strukturę 17-3-2, z wagami inicjalizowanymi losowo w przedziale (-0.3, 0.3) i sigmoidalnymi funkcjami aktywacji. W zbiorze danych było 5230 próbek, z czego 4000 użyto do uczenia sieci. Pozostałe wykorzystano podczas testowania,

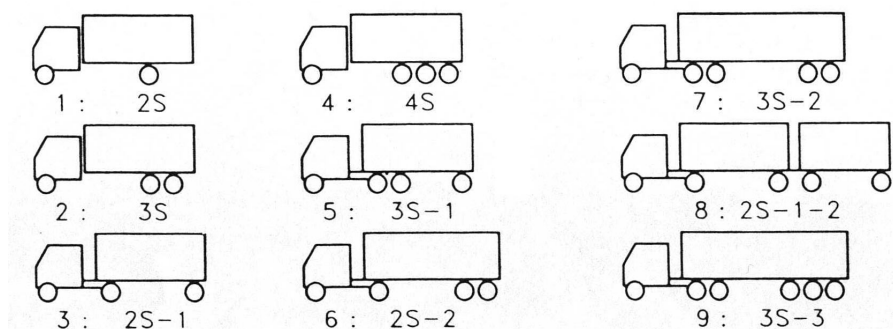


prorowadzonego po zakończeniu procesu uczenia (po 10 000 epok). Tak nauczona sieć poprawnie sklasyfikowała od 77 do 87.5% prawidłowych reakcji przy błędzie dopuszczalnym od 5 do 25%. Wynik ten za każdym razem pozostawał lepszy niż porównywalny rezultat osiągnięty formułą empiryczną.

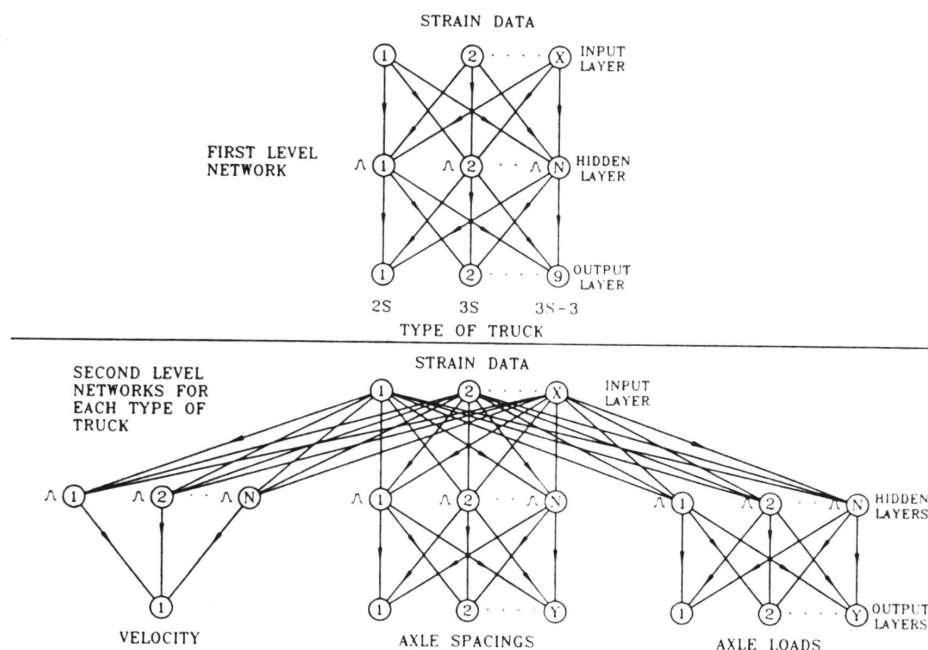


Rys. 4.4.1 Schemat eksperymentu z [22] – widoczne ustawienie czujników pomiarowych.

W [22, 75] określano parametry pojazdu przejeżdżającego przez wybrany przekrój poprzeczny jezdni. W [75] określano ciężar przejeżdżającego pojazdu stosując sieć ze wsteczną propagacją błędu. W [22] z pomiaru odkształceń mostu oceniano takie parametry pojazdów jak prędkość przejazdu, odstęp pomiędzy osiami pojazdu, obciążenie przypadające na oś. Schemat eksperymentu pokazano na rys. 4.4.1. Zastosowano sieci o radialnych funkcjach bazowych. W trakcie analizy rozważano 9 różnych typów samochodów ciężarowych (por. rys. 4.4.2), stosując sieci dwumodułowe (rys. 4.4.3). Pierwszy moduł rozpoznaje i klasyfikuje typ pojazdu. W drugim module zaś trzy rodzaje sieci rozpoznają kolejno prędkość, odległość pomiędzy osiami i obciążenie osi, odpowiadające danemu typowi sklasyfikowanego pojazdu. Rozważania dotyczyły tylko pojedynczych pojazdów przejeżdżających przez przekrój. Do nauczania sieci użyto danych eksperymentalnych, oraz wygenerowanych przy pomocy MES. Łącznie dla sieci rozpoznającej typ pojazdu wygenerowano 4131 wzorców uczących oraz 270 wzorców testujących. Pierwsza sieć miała topologię 48-200-9; w drugim module stosowano sieci o topologiach od 45 do 90 neuronów wejściowych 10, 100 lub 1000 neuronów w warstwie ukrytej i 1, 2 lub 3 neurony w warstwie wyjściowej. Wyniki uzyskane w trakcie uczenia, testowania i sprawdzania danych eksperymentalnych w odniesieniu do pojazdu typu 3 z rys.4.4.3 były zadowalające. Sieć rozpoznawała i klasyfikowała, z pewnym przybliżeniem, wszystkie atrybuty pojazdu.

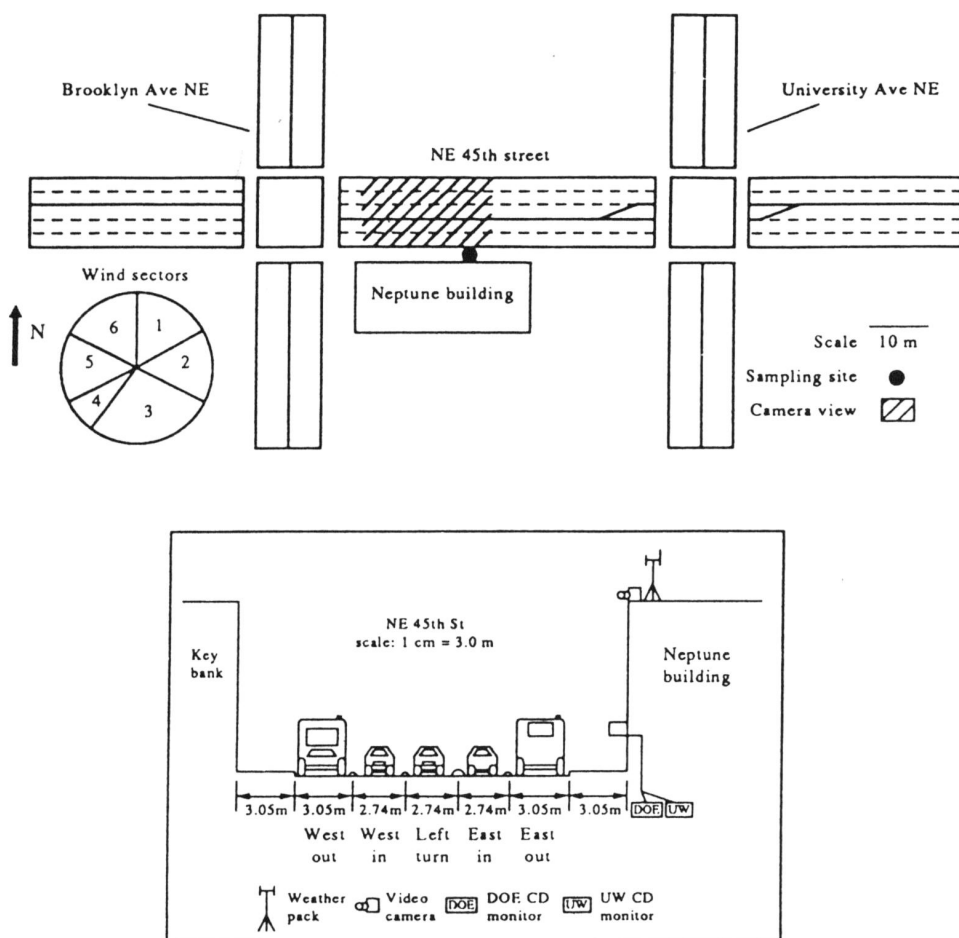


Rys. 4.4.2 Typy pojazdów klasyfikowane przez SSN z [22].



Rys. 4.4.3 SSN użyta do analiz w [22].

W [60] zastosowano sieci neuronowe ze wsteczną propagacją błędów w celu określenia oczekiwanego poziomu zanieczyszczenia powietrza tlenkiem węgla w otoczeniu skrzyżowań w centrum dużego miasta (Seattle, USA). Sytuację pomiarową zobrazowano na rys.4.4.4. Sieć składająca się z 32 neuronów w warstwie wejściowej, odwzorowujących wybrane, mierzone parametry ruchu i warunki atmosferyczne, 17 neuronów w warstwie pośredniej i 1 neuronu w warstwie wyjściowej, który to neuron opisywał przewidywaną koncentrację tlenku węgla (CO). Zbiór wzorców stanowiło 201 próbek - średnich 1-minutowych wszystkich zmiennych. 22 próbki stanowiły podzbiór testujący sieć, uczoną tu do 5% wartości błędów średnich. Nauczona sieć w 70% przypadków opisywała prawidłowo dane testujące. Dodatkowo pozwalała na wyjaśnienie tzw. efektów brzegowych, odnoszących się do warunków ruchowo-drogowych na skrajnych pasach pięciopasowego przekroju poprzecznego jezdni.



Rys. 4.4.4 Schemat eksperymentu opisanego w pracy [60].

Wszystkie przedstawione wyżej przykłady zastosowania SSN w inżynierii drogowej dotyczą skomplikowanych, często trudnych do opisanja jawnymi relacjami zależności pomiędzy parametrami ruchowo-drogowymi, związanymi z pojazdami a efektem działania pojazdów. Użycie sieci neuronowych pozwoliło niejednokrotnie na znacznie dokładniejsze przybliżenia relacji pomiędzy, wielkościami wejścia i wyjścia. Pozwalało to na eliminację w analizach zbędnych (o niewielkim wpływie) wielkości wejściowych (por. [35]) oraz na budowanie modeli empirycznych o bardziej uniwersalnych właściwościach.

## 5 Konstruowanie modelu umożliwiającego wyznaczenie spektrum odpowiedzi drgań drogowych przy założonych warunkach ruchowo-drogowych

### 5.1 Badania dynamiczne źródłem informacji niezbędnych w procesie konstruowania modelu

Na wstępie przeprowadzono analizę możliwych do rejestracji parametrów ruchu, mierników warunków ruchu drogowego, cech drogi i podłoża oraz charakterystyki organizacji ruchu (por. [19, 73]) pod kątem ich identyfikacji podczas badań. Kluczowy wpływ na generowanie drgań drogowych ma natężenie ruchu drogowego - liczone w liczbie pojazdów w określonej jednostce czasu ( $Q - P/h$ ,  $P/15 \text{ min.}$ ). Jednakże w potoku pojazdów najbardziej znaczące, z uwagi na poziom generowanych drgań, są przejazdy pojazdów ciężkich. W opisie natężenia ruchu drogowego określa się ich procentowy udział ( $u_c$ ). Jeżeli więc drogę charakteryzuje, w danym przekroju, stały wskaźnik  $u_c$ , a zwiększa się wskaźnik  $Q$  to oznacza, że ruch pojazdów ciężkich również zwiększa się. Tym samym budowie w otoczeniu drogi poddawane są intensywniejszym działaniom dynamicznym.

W analizie wpływu na środowisko drgań generowanych przejazdem pojazdów po jezdni istotnym parametrem opisu tego przejazdu jest prędkość pojazdu. W opisie prędkości przejazdu występują takie określenia jak: prędkość chwilowa (tzw. punktowa) w przekroju, prędkość jazdy (na danym odcinku), czy nawet prędkość podróży (mniej istotna w analizie opisywanego zjawiska). W otoczeniu skrzyżowań istotne mogą być informacje o wartości przyspieszenia albo opóźnienia związanego z ruszaniem lub hamowaniem pojazdu.

W grupie znaczących czynników związanych z wpływem na środowisko drgań drogowych występują takie cechy arterii komunikacyjnych jak: geometria drogi (wyprofilowania, łuki, spadki), jej podbudowa (podłoże na jakim została wybudowana), kształt przekroju drogi (np. występowanie rowów na poboczu drogi), itp. Wszystko to ma wpływ na rozprzestrzenianie się drgań w otoczeniu drogi. I tak np. podłoże drogi (z reguły uwarstwione) oraz poziom wody gruntowej powodują, że rozprzestrzeniające się fale doznają wielokrotnych odbić i załamania co może wpływać na lokalne wzmocnienie drgań w otoczeniu drogi.

Również cechy geometryczne nawierzchni (jej typ, równość i szorstkość, występowanie lokalnych przelomów, albo inne uszkodzenia nawierzchni w otoczeniu skrzyżowań) mogą wpływać znacząco na poziom drgań generowanych przejazdami. A cóż dopiero powiedzieć o cechach pojazdu przejeżdżającego przez analizowany przekrój (typ i rodzaj pojazdu, stopień wypełnienia, stan techniczny).

Kształtowanie modelu umożliwiającego wyznaczenie spektrum odpowiedzi drgań drogowych przeprowadzono wykorzystując SSN. Wymagało to najpierw zebrania, na podstawie odpowiednio zaplanowanych i zrealizowanych badań doświadczalnych informacji źródłowych wiążących wielkości charakteryzujące drgania z wartościami parametrów opisujących warunki ruchowo-drogowe w miejscach rejestracji tych drgań.

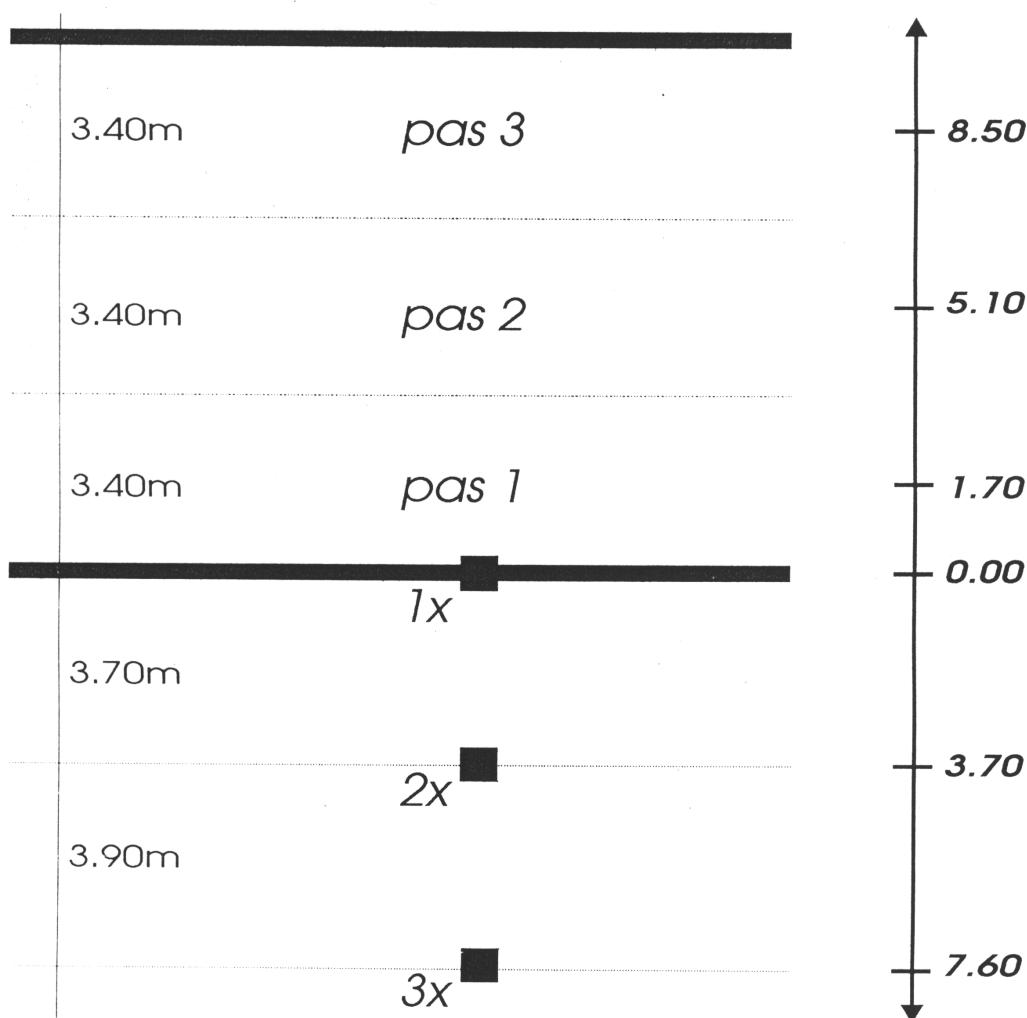
Zbiór wyników badań uzyskiwano podczas przeprowadzanych - w różnych, wybranych przekrojach – eksperymentów biernych oraz eksperymentów czynnych.

Spośród wymienionych już wyżej wielkości opisujących warunki ruchowo-drogowe starano się wybrać najistotniejsze i jednocześnie możliwe do wyznaczenia podczas eksperymentów. I tak np. zdecydowano się na badania w przekrojach drogowych o dobrym stanie technicznym (jedynie wstępne badania w przekroju 2 – opisane w rozdz. 3 - były prowadzone w zdegradowanym przekroju ulicy), na odcinkach prostych jezdni o kilku pasach ruchu. Mierząc prędkość średnią na badanym odcinku nie uwzględniono sposobu poruszania się pojazdu (przyspieszeń i opóźnień, krzywizny toru jazdy, itp.). Nie brano też pod uwagę zmian wysokości w przekroju poprzecznym w badanych profilach pomiarowych.

W trakcie regularnego ruchu drogowego (eksperyment bierny) pojazdy pojawiały się w przekroju w sposób przypadkowy, w różnych konfiguracjach, na różnych pasach ruchu i w różnych kierunkach jazdy. Wibrogramy przypisywano do pojedynczego pojazdu jedynie

wówczas, gdy wyraźnie widać było na rejestracji wideo, że pojazd ciężki przejeżdżał samodzielnie przez przekrój pomiarowy i dało się ten przejazd wyróżnić z zarejestrowanego przebiegu przyspieszeń drgań. W pozostałych przypadkach stosowano klasyfikację złożoną (przejazd dwóch lub więcej pojazdów) nie uwzględniając w niej kierunku ruchu pojazdów. Same przejazdy przypisywano przejazdowi pojazdu przez środek pasa ruchu w danym przekroju i traktowano tę odległość jako stałą w całym badanym przekroju i dla każdego pasa ruchu oddzielnie.

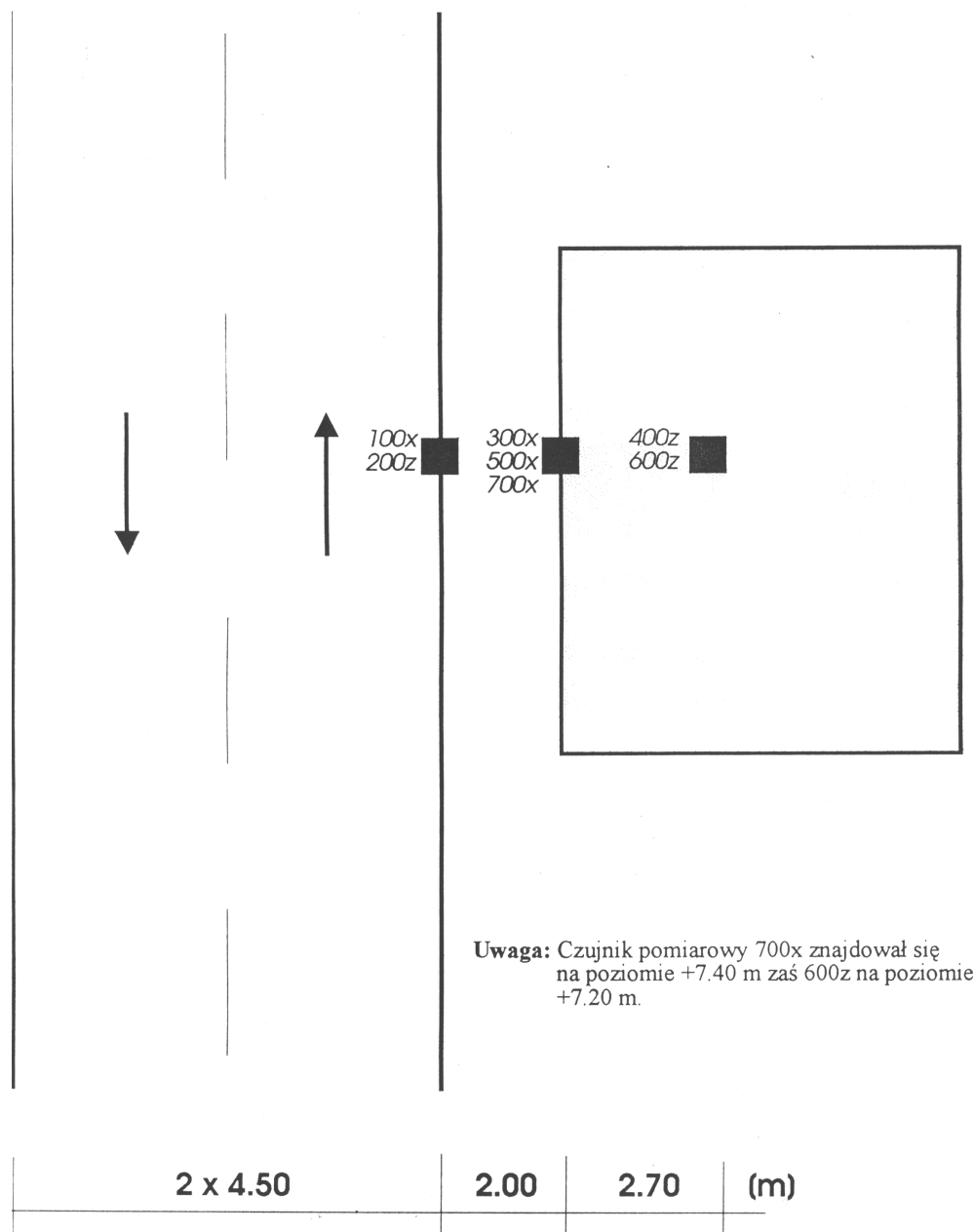
Podczas badań przeprowadzono również pomiary drgań wywołanych pojazdem sterowanym, na wydzielonym odcinku drogi (tzw. eksperyment czynny). W tych badaniach pojazdem testowym był dwuosiowy samochód ciężarowy „Star”, o średnim stanie technicznym, bez wypełnienia skrzyni ładunkiem. Badania sterowane odbyły się na nowo wybudowanym odcinku jezdni o nawierzchni asfaltowej i podbudowie betonowej o trzech pasach ruchu, w płaskim przekroju poprzecznym. Badania podczas przejazdów sterowanych przeprowadzono w przekroju A, który schematycznie scharakteryzowano tu na rys. 5.1.1.



Rys. 5.1.1 Charakterystyka i położenie czujników pomiarowych w przekroju A

Badania przeprowadzone podczas eksperymentu biernego wykonano w przekroju B (szkic podano na rys. 5.1.2) oraz w przekroju C (szkic podano na rys. 5.1.3). W badaniach ciągłych (eksperyment bierny) wybierano te wyniki, które odpowiadały przejazdowi pojazdów ciężkich. Pojazdy te zakwalifikowano do czterech klas, z uwagi na ich rodzaj:

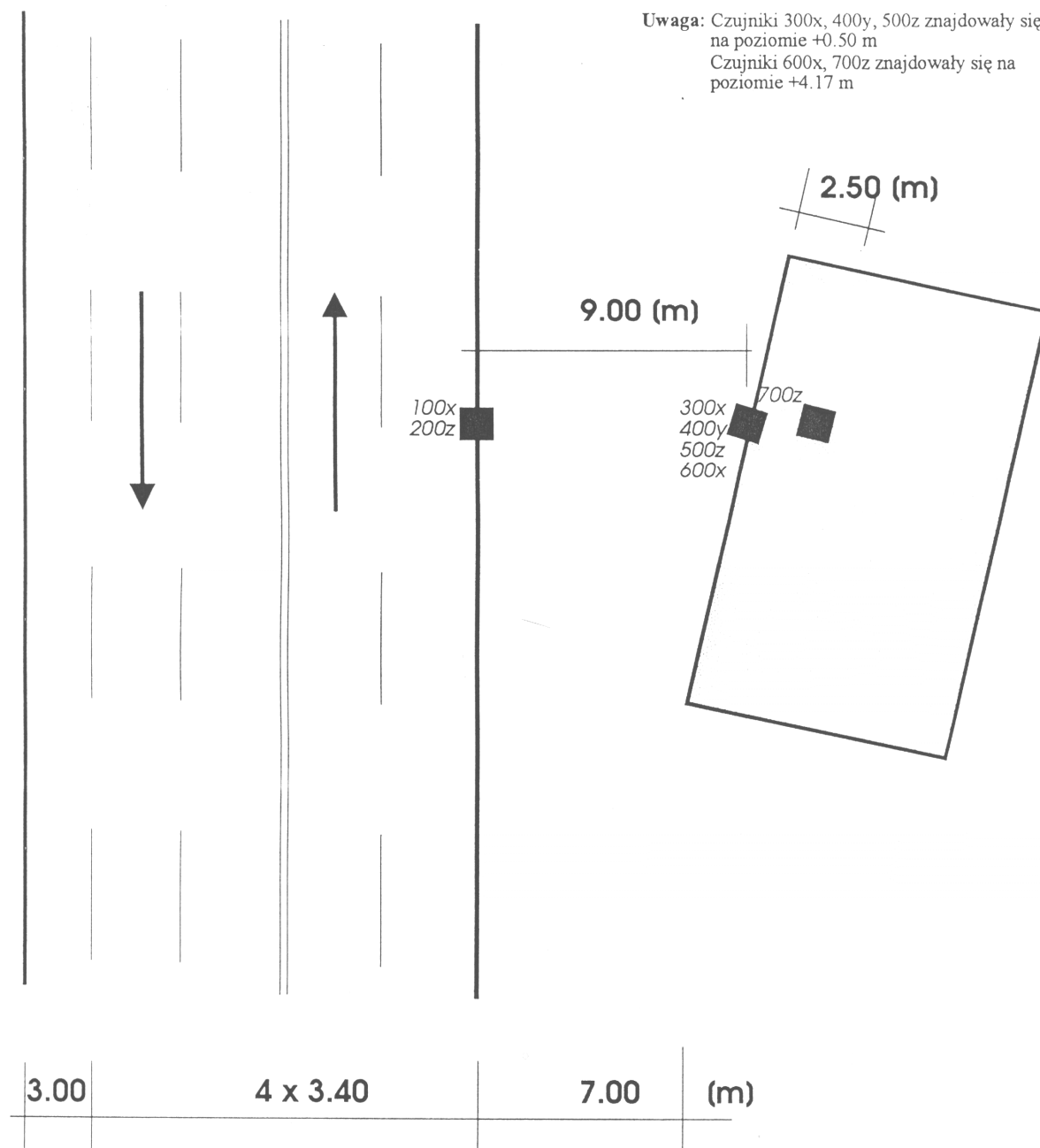
- ⇒ samochody ciężarowe,
- ⇒ samochody ciężarowe z przyczepami (naczepami),
- ⇒ autobusy,
- ⇒ autobusy przegubowe.



**Uwaga:** Czujnik pomiarowy 700x znajdował się na poziomie +7.40 m zaś 600z na poziomie +7.20 m.

**Rys. 5.1.2** Charakterystyka i położenie czujników pomiarowych w przekroju B.

Nie uwzględniono w zbiorze parametrów opisujących źródło drgań występujących podczas badań takich informacji jak: stopień wypełnienia pojazdów oraz ich stan techniczny. Nie było bowiem możliwe zebranie tych informacji podczas eksperymentów biernych bez zastosowania innych, specjalistycznych metod oceny albo bez badań ankietowych (kierowców) i technicznych (poszczególnych pojazdów). Wyniki dalszych analiz odnoszą się do drgań poziomych, prostopadłych do osi drogi. W przypadku wibrogramów uzyskanych w punktach pomiarowych na budynkach uwzględniano jedynie fakt, że drgania rejestrowano na konstrukcji (ściana piwnicy, fundament). Nie wnikano w wartości charakterystyki dynamicznej budowli. Wszystkie budynki należały do klasy budynków niskich.



**Rys. 5.1.3** Charakterystyka i położenie czujników pomiarowych w przekroju C (podczas pierwszej serii badań).

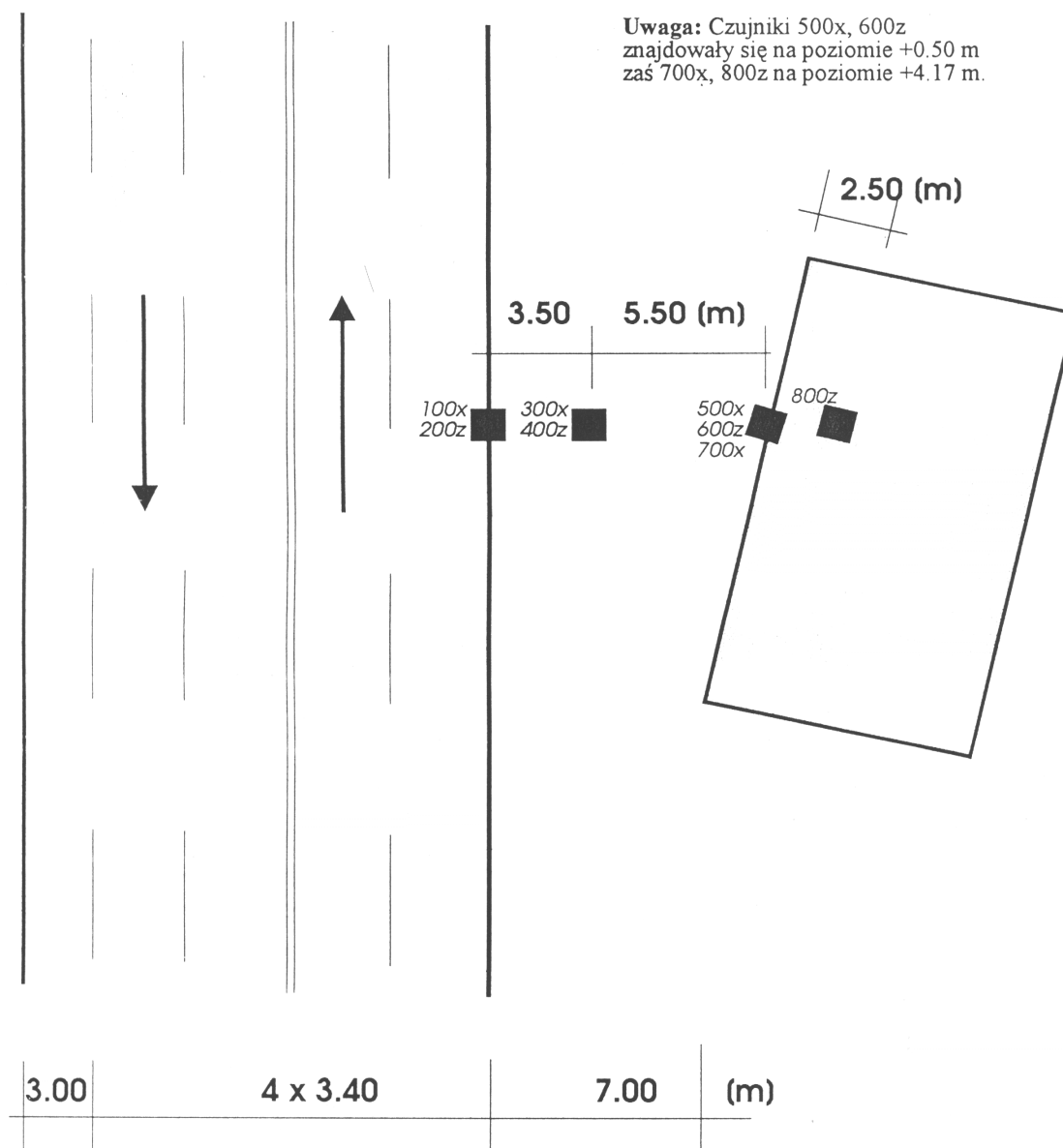
Kompleksowe badania przeprowadzono w trzech przekrojach pomiarowych w przekroju A badano przejazdy pojazdu testowego; przekrój B obrano na ulicy w centrum miasta; przekrój C obrano na ulicy o dużym natężeniu ruchu. Lokalizacja przekroju B powodowała, że w nim zdecydowaną większość pojazdów ciężkich stanowiły autobusy i autobusy przegubowe (por.[43]). W przekroju C z kolei, większość spośród pojazdów ciężkich stanowiły samochody ciężarowe. Nie oznacza to bynajmniej, że w tych przekrojach nie występowały inne pojazdy ciężkie, a jedynie świadczy o dominującym rodzaju pojazdów.

Punkty pomiarowe w poszczególnych przekrojach dobierano tak, aby jeden z nich znajdował się na krawężniku (na krawędzi jezdni), a pozostałe rozmieszczano na gruncie (albo chodniku) wzdłuż linii prostopadłej do osi jezdni. Jeśli w przekroju pomiarowym występował budynek (przekroje B i C), to wybierano punkty pomiarowe także na budynku.

W przekroju B w odległości 2 m od krawężnika jezdni usytuowany był budynek niski, murowany, wielokrotnie przebudowywany. Jest on w całości podpiwniczony. Strop

piwnicy jest stropem typu kolebkowego, zaś stropy poszczególnych kondygnacji są stropami typu Kleina. Zwieńczeniem budynku jest dach o więźbie drewnianej kryty blachą. Na tym budynku umieszczono akcelerometry (por. rys. 5.1.2) w poziomie stropu nad piwnicami (na ścianie zewnętrznej od strony ulicy i od strony piwnicy), na stropie nad piwnicami oraz w poziomie stropu nad drugą kondygnacją (na ścianie zewnętrznej i na stropie).

W przekroju B odcinek ulicy sąsiadującej z budynkiem jest odcinkiem międzywęzłowym. Jest to ulica dwupasowa (o szerokości pasa 4,50 m), asfaltowa, o podbudowie z kostki brukowej. Rejestracje odbywały się w systemie ciągłym 15 minutowym. Równocześnie w badanym przekroju prowadzono przy pomocy kamery wideo zsynchronizowaną rejestrację potoku pojazdów oraz radarowe pomiary prędkości ruchu pojazdów.



**Rys. 5.1.4** Charakterystyka i położenie czujników pomiarowych w przekroju C (podczas drugiej serii badań).

Badania przeprowadzone w przekroju C (por. rys. 5.1.3 i 5.1.4) ulicy o dużym natężeniu ruchu wykonano w dwóch seriach: najpierw wykonano je w godzinach popołudniowych (rys. 5.1.3), a następnie w godzinach dopołudniowych (rys. 5.1.4). Budynek usytuowany w przekroju C ma kształt nieregularny. Jest on usytuowany ukośnie do jezdni. Jest to budynek mieszkalny o trzech kondygnacjach, niepodpiwniczony. Stropy wykonano jako żelbetowe. Dach na więźbie drewnianej kryty jest papą. Ściany budynku



wykonano z cegły. Jest on usytuowany w pobliżu jezdni o pięciu pasach ruchu. Szerokość każdego z czterech pasów jezdni wynosi 3,40 m, pasa najbardziej odległego zaś 3,00 m. Przekrój pomiarowy obrano na odcinku między skrzyżowaniami z sygnalizacją świetlną. Punkty pomiarowe w pierwszej serii badań umieszczono: na krawężniku, oraz w budynku (na fundamencie i na pierwszym piętrze, w poziomie stropu nad parterem). Podczas pomiarów przeprowadzanych w drugiej serii (w godzinach popołudniowych) liczbę punktów pomiarowych powiększono o umieszczony na chodniku w odległości odpowiadającej szerokości pasa ruchu (rys. 5.1.4). Zrezygnowano jednocześnie z pomiaru drgań w kierunku równoległym do ściany frontowej w poziomie stropu nad parterem budynku. Rejestracje ciągłe prowadzono (z uwzględnieniem sygnalizacji świetlnej) w 16 minutowych odcinkach czasu. Podobnie jak podczas badań w przekroju B prowadzono rejestrację wideo, tym razem jednak z dwóch zsynchronizowanych kamer.

W trakcie wszystkich badań i późniejszego opracowywania ich wyników nie brano pod uwagę informacji o warunkach meteorologicznych. Warunki te były korzystne, tzn. bez załamań pogody i dużych gradientów temperatur oraz bez opadów deszczu. Badania prowadzono w okresie wiosenno-letnim.

## 5.2 Opracowanie numeryczne wyników badań doświadczalnych

Wibrogramy uzyskane podczas badań wstępnych (por. rozdz. 3), jak i badań zasadniczych w opisanych wyżej trzech przekrojach drogowych poddano analizie. W jej wyniku otrzymano najpierw w każdym przekroju zbiory wyselekcjonowanych wibrogramów wraz ze szczegółowym opisem parametrów ruchowo-drogowych odpowiadających rejestracji. W zbiorze tych parametrów uwzględniono:

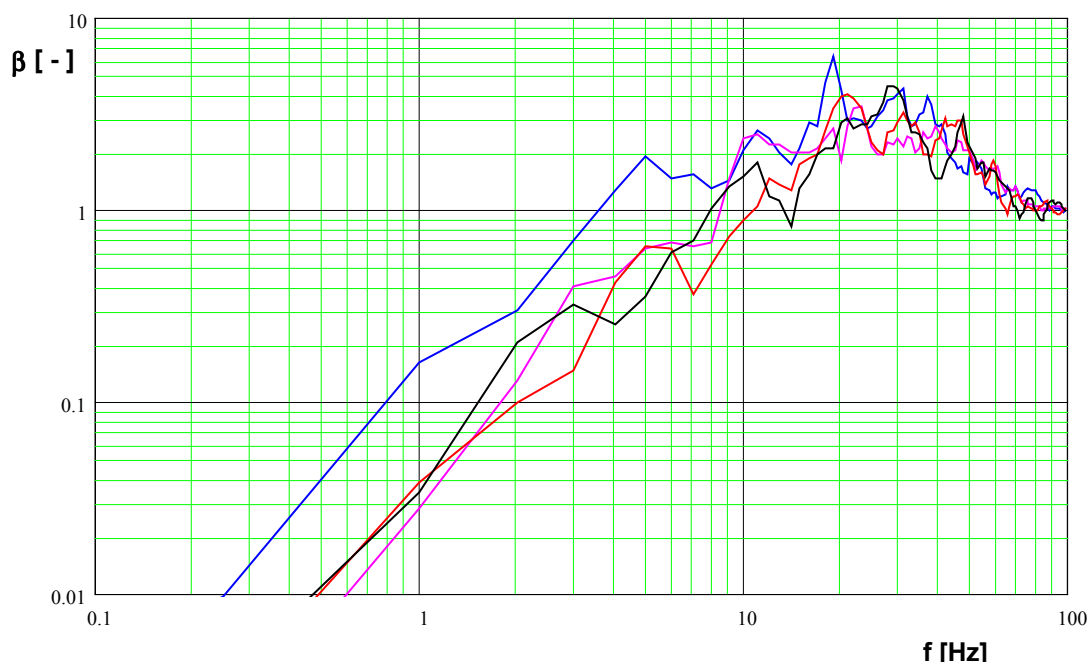
1. przekrój pomiarowy,
2. numer czujnika,
3. typ pojazdu (pojazdów) z przypisaną każdemu informacją o:
  - prędkości przejazdu,
  - pasie przejazdu.

Następnie każdy z wibrogramów wykorzystano do wyznaczenia wartości maksymalnej przyspieszenia drgań, względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi ( $\beta$ ) oraz przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi ( $S_a$ ). Spektra odpowiedzi wyznaczano przy założeniu tłumienia  $\xi = 0.02$ . Na podstawie tak utworzonego zbioru informacji nie było możliwe dokonanie oceny wpływu zmiany parametrów ruchowo-drogowych na kształt i wartości przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. Zasadniczą przyczyną była liczba parametrów ruchowo-drogowych zmienianych podczas badań. Dobrą ilustracją tego spostrzeżenia są wyniki analiz i obliczeń przedstawione w dalszej części niniejszego rozdziału.

Wyniki pomiarów przetworzono do postaci cyfrowej. Z powodu cyfrowej akwizycji danych, skorzystano z filtrowania cyfrowego Butterwortha (por. np. [2, 3]). Podobnie jak w przypadkach opisanych w rozdz. 3 częstotliwość próbkowania przekraczała częstotliwość Nyquista (por. np. [21]). W procesie analizy sygnału próbkowano go częstotliwością 1024 Hz. Na rys. 5.2.1 zamieszczono obliczone spektra odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego przez przekrój pomiarowy A, w punkcie pomiarowym na krawężniku jezdni, w kierunku poziomym, prostopadłym do osi drogi. Pojazd przejeżdżał przez badany przekrój z różnymi prędkościami od 30 do 90 km/h. W tablicy 5.2.1 podano wartości maksymalnych przyspieszeń zarejestrowanych podczas przejazdu pojazdu testowego. Wyszczególniono tam także wartości maksymalne przyspieszeń w pozostałych punktach pomiarowych usytuowanych w rozważanym przekroju pomiarowym na gruncie w odległości 3.70 i 7.60 m od krawędzi drogi. Uzyskane na podstawie obliczeń wykresy spektrum odpowiedzi w tych punktach pomiarowych podano na rys. 5.2.2 i 5.2.3.

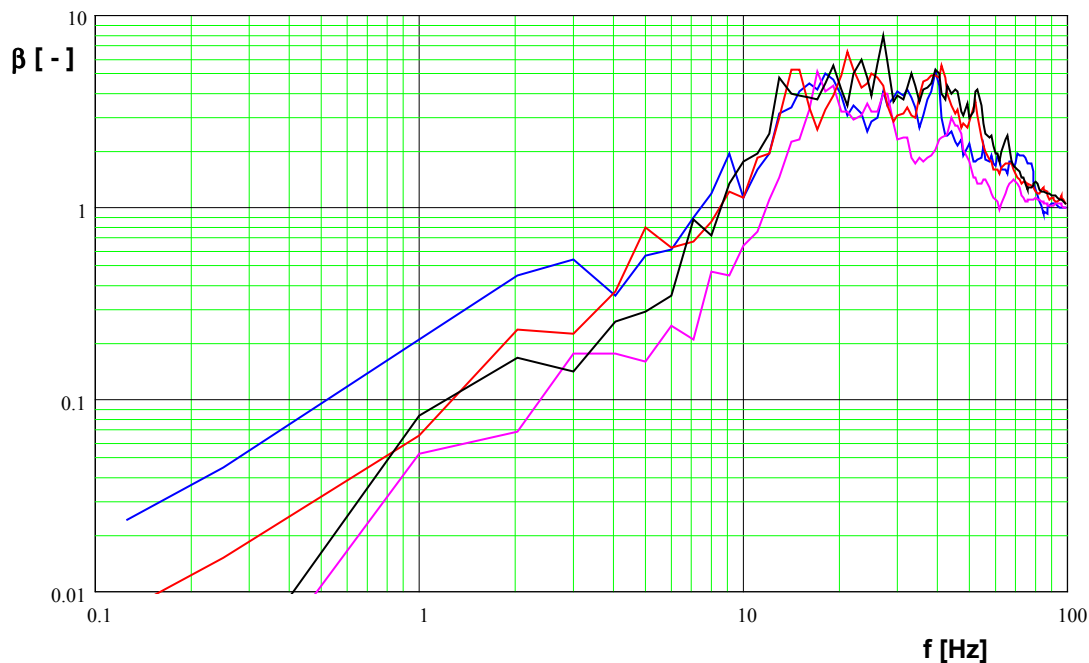
**Tablica 5.2.1** Maksymalne przyspieszenia drgań poziomych prostopadłych do osi drogi zarejestrowane w przekroju A przy pojeździe testowym.

Nr pomiaru	Prędkość pojazdu testowego [km/h]	Pas ruchu	Maksymalne przyspieszenie zarejestrowane w:		
			punkcie na krawężniku $A_{max}$ [cm/s <sup>2</sup> ]	punkcie na gruncie (3.70 m od krawężnika) $A_{max}$ [cm/s <sup>2</sup> ]	punkcie na gruncie (7.60 m od krawężnika) $A_{max}$ [cm/s <sup>2</sup> ]
1	30	1	4.32	0.90	0.75
2	50	1	9.37	2.98	2.34
3	70	1	12.25	1.61	1.40
4	90	1	13.81	1.98	1.88
5	70	2	3.70	1.77	1.19
6	90	2	5.12	1.75	1.81

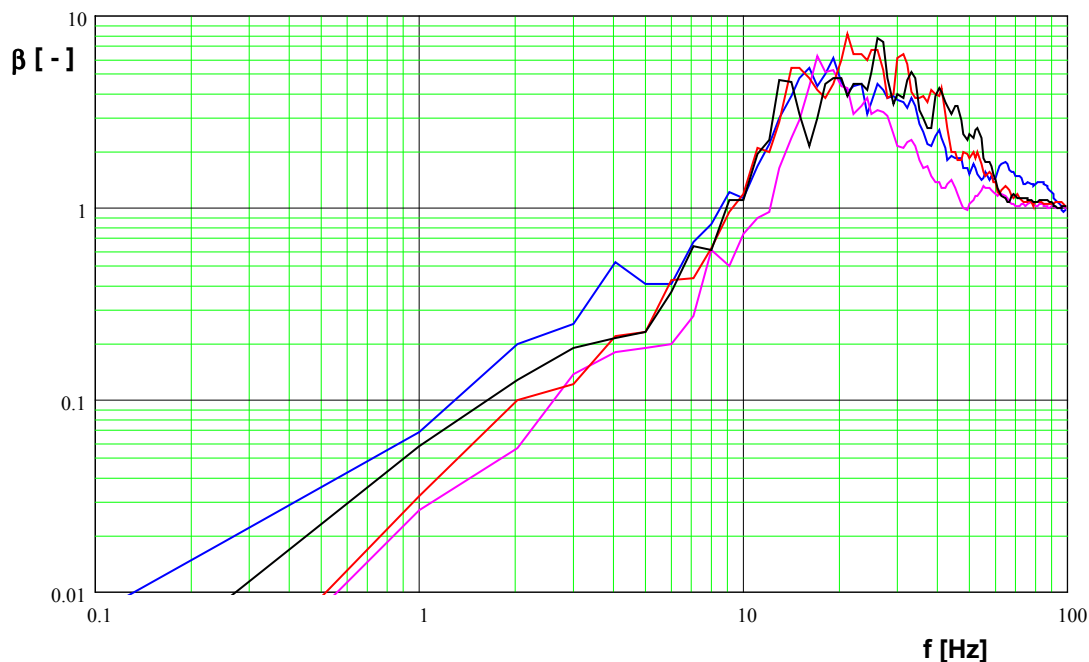
**Rys. 5.2.1** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego w przekroju A odpowiadające drganiom zarejestrowanym na krawędzi jezdni (punkt pomiarowy na krawężniku).

Na kolejnych wykresach (rys. 5.2.4, 5.2.5 i 5.2.6) pokazano obliczone, względne spektra odpowiedzi uzyskane na podstawie wibrogramów odpowiadających przejazdom pojazdu testowego z prędkościami 70 i 90 km/h po pasie pierwszym (środek pasa ruchu odległy od krawężnika o 1.70 m). Na rys. 5.2.7, 5.2.8 i 5.2.9 podano wykresy od przejazdów po pasie drugim z tymi samymi prędkościami (odległość środka pasa od krawężnika wynosiła tu 5.10 m). Z kolei na rys. 5.2.10 i 5.2.11 podano wykresy względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego z prędkością 70 km/h i 90 km/h odpowiadających drganiom zarejestrowanym we wszystkich punktach pomiarowych. Wykresy odpowiadające prędkościom przejazdu pojazdu testowego 70 i 90 km/h wskazują wyraźnie na zmniejszanie rzędnych w przedziale częstotliwości poniżej 10 Hz a także wraz ze wzrostem odległości od krawędzi jezdni. Zjawisko to można zaobserwować przy przejeździe pojazdu po pasie pierwszym, jak i po pasie drugim.

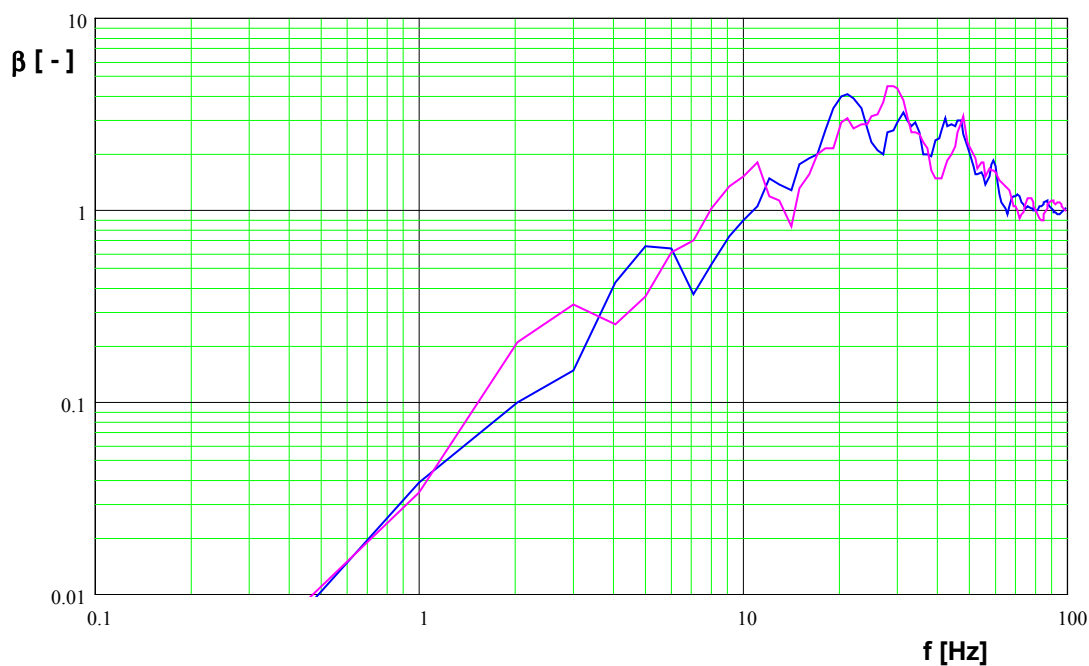
Na rys. 5.2.1 można zauważyć jedną wyraźnie różniącą się od pozostałych krzywą spektralną, która odpowiada przejazdowi pojazdu testowego z prędkością 30 km/h. Wyraźny wzrost rzędnych obrazuje efekt dynamiczny tego przejazdu.



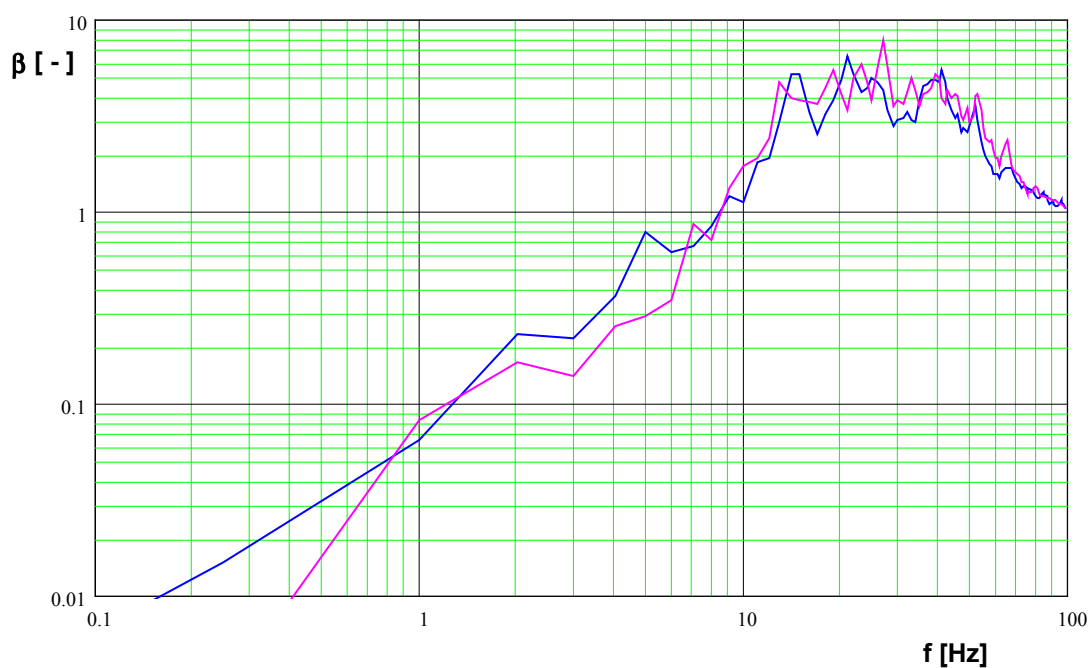
**Rys. 5.2.2** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego w przekroju A odpowiadające drganiom zarejestrowanym na gruncie w odległości 3.70 m od krawężnika.



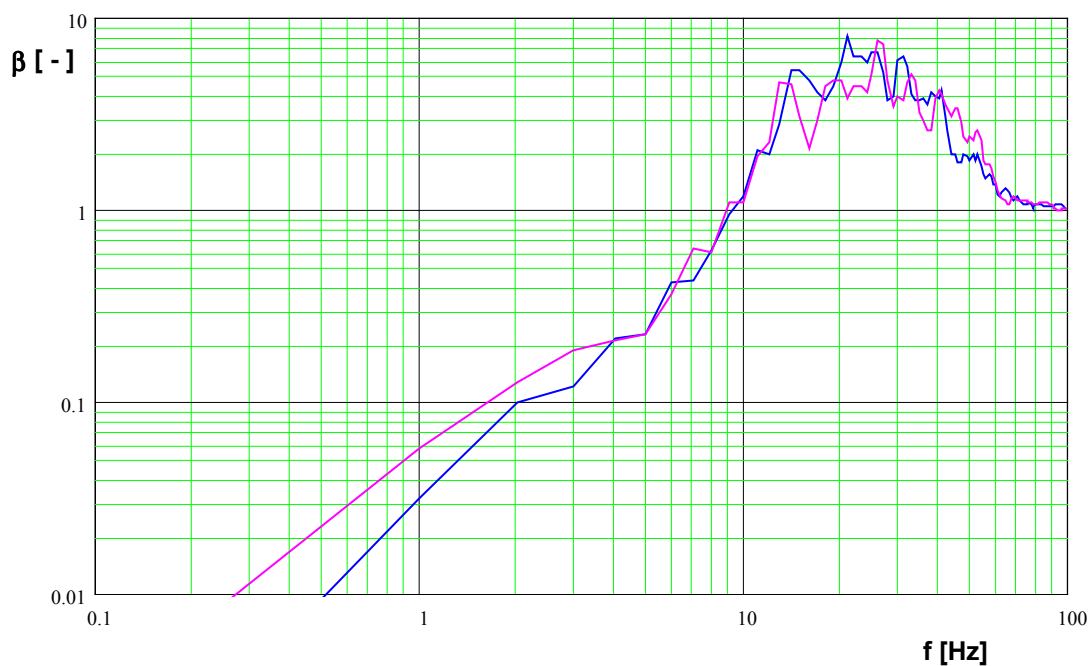
**Rys.5.2.3** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego w przekroju A odpowiadające drganiom zarejestrowanym na gruncie w odległości 7.60 m od krawężnika.



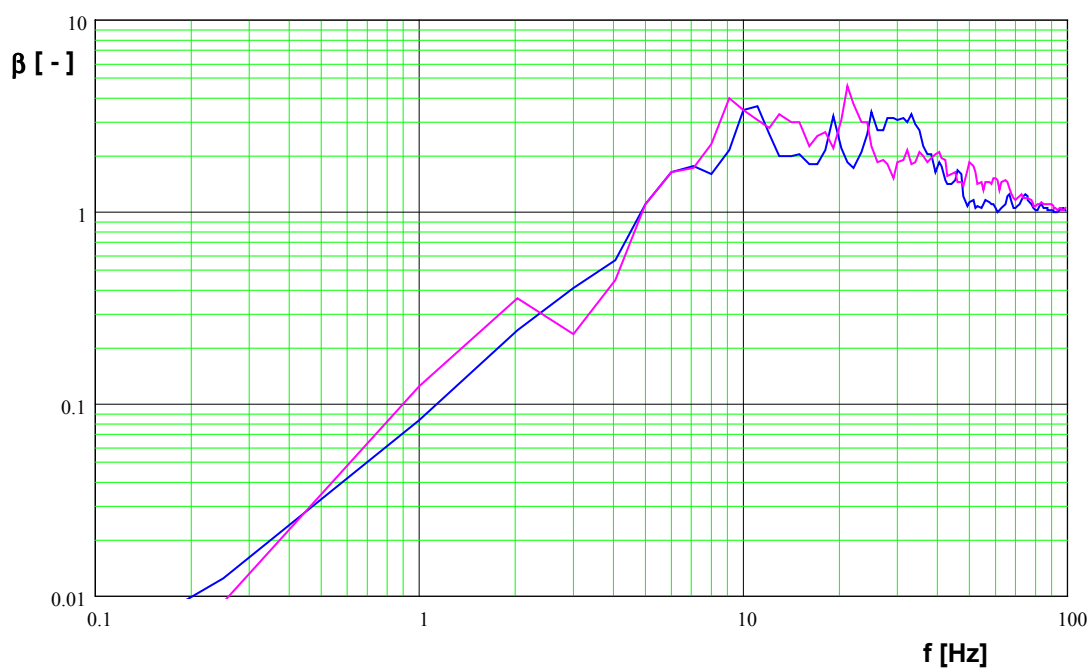
**Rys.5.2.4** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego w przekroju A z prędkością 70 i 90 km/h po pasie pierwszym, w przekroju A odpowiadające drganiom zarejestrowanym na krawężni jezdni (punkt pomiarowy na krawężniku).



**Rys.5.2.5** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego w przekroju A z prędkością 70 i 90 km/h po pasie pierwszym, w przekroju A odpowiadające drganiom zarejestrowanym na gruncie w odległości 3.70 m od krawężnika.

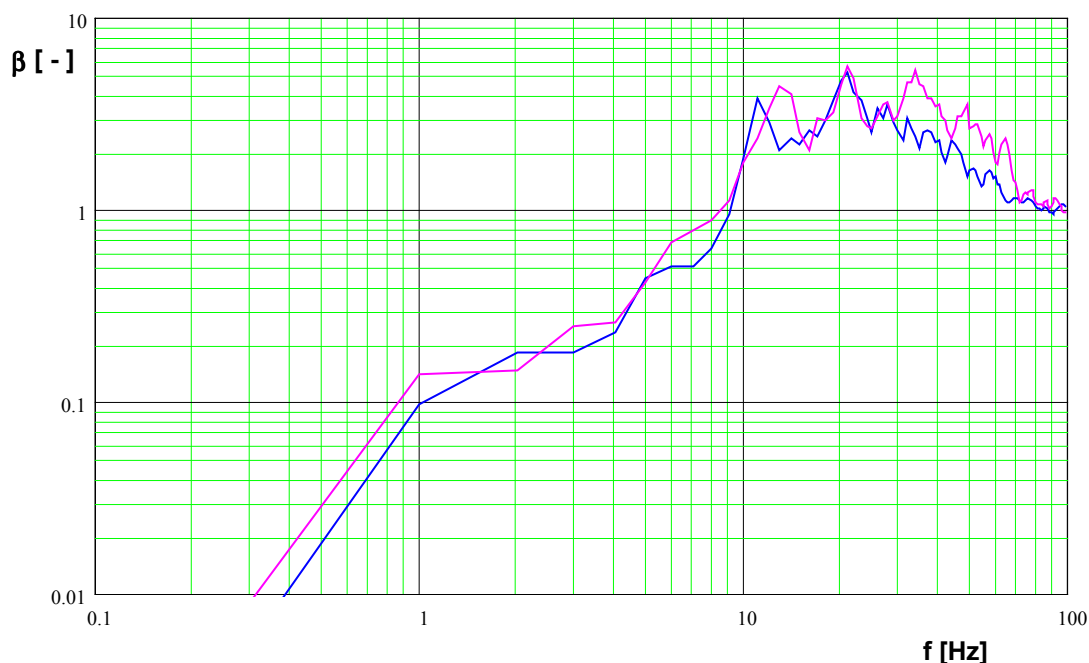


**Rys.5.2.6** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego w przekroju A z prędkością 70 i 90 km/h po pasie pierwszym, w przekroju A odpowiadające drganiom zarejestrowanym na gruncie w odległości 7.60 m od krawężnika.

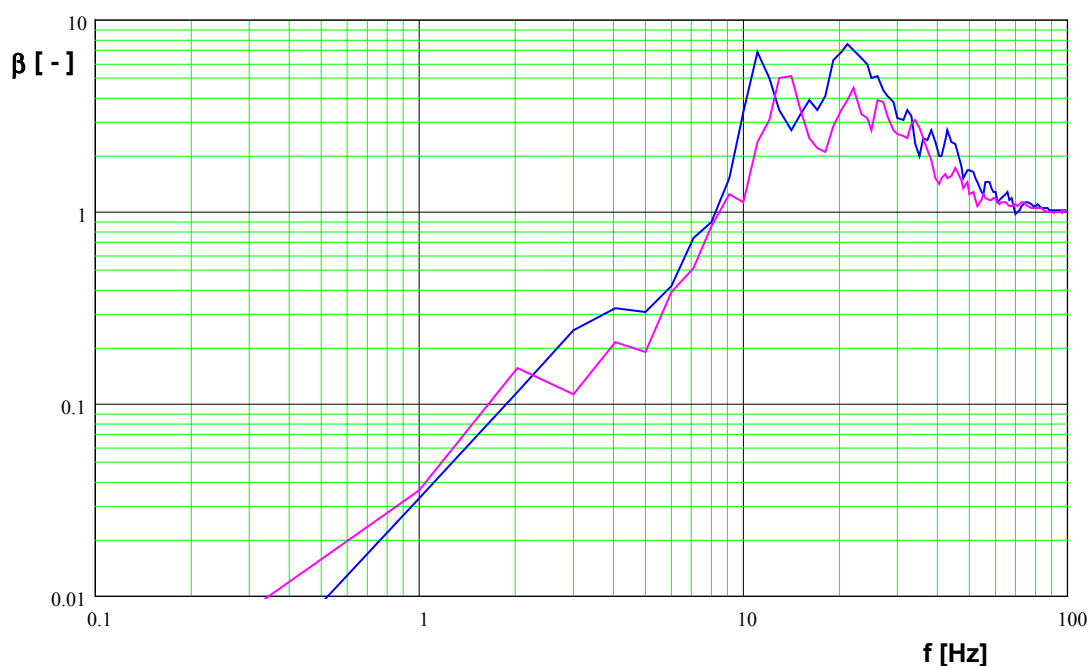


**Rys.5.2.7** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego w przekroju A z prędkością 70 i 90 km/h po pasie drugim, w przekroju A odpowiadające drganiom zarejestrowanym na krawędzi jezdni (punkt pomiarowy na krawężniku).

Już wcześniej wspomniano, że w przekroju pomiarowym B, dominowały w potoku pojazdów ciężkie autobusy oraz autobusy przegubowe. Prędkości osiągnięte przez te pojazdy zarejestrowane podczas badań wynosiły od 15 do prawie 50 km/h.

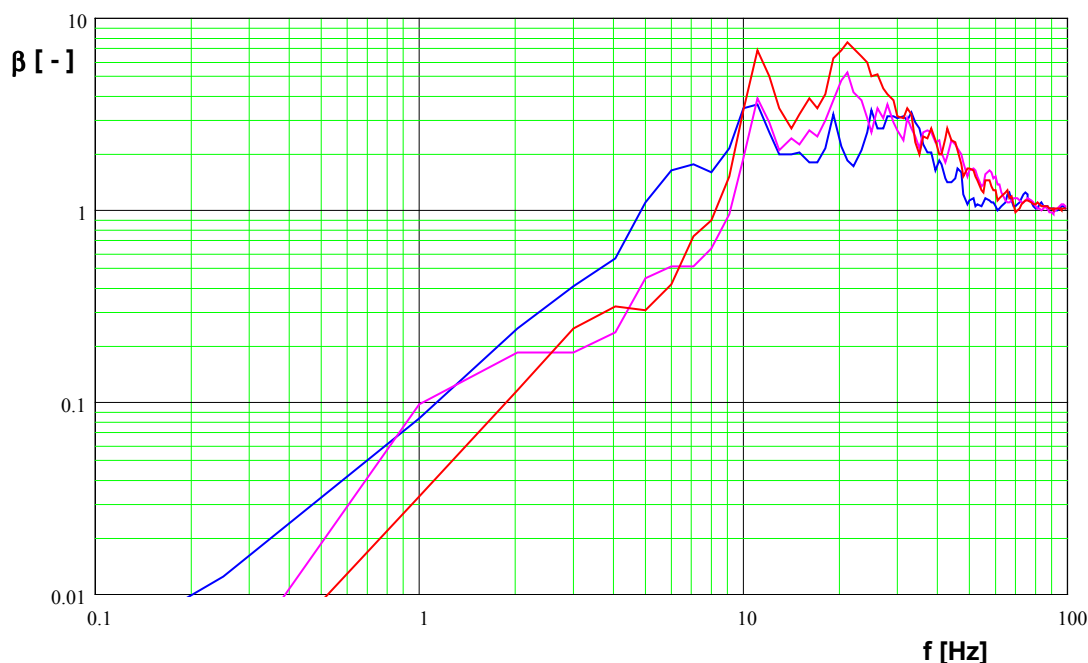


**Rys.5.2.8** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego w przekroju A z prędkościami 70 i 90 km/h po pasie drugim, w przekroju A odpowiadające drganiom zarejestrowanym na gruncie w odległości 3.70 m od krawężnika.

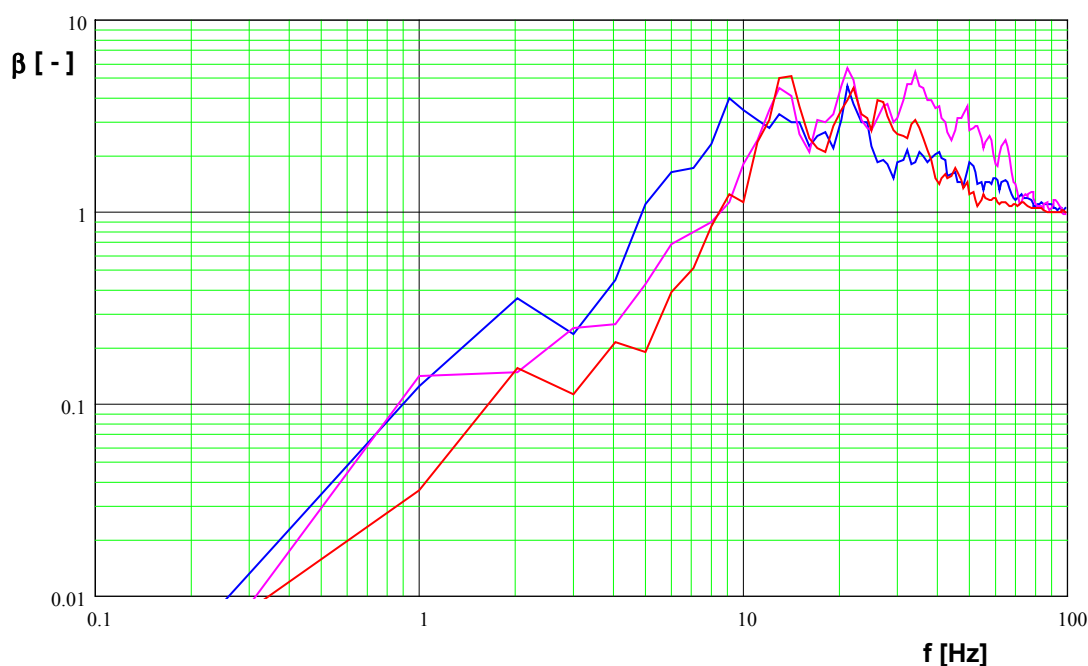


**Rys. 5.2.9** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego w przekroju A z prędkościami 70 i 90 km/h po pasie drugim, w przekroju A odpowiadające drganiom zarejestrowanym na gruncie w odległości 7.60 m od krawężnika.

Na kolejnych rysunkach podano wykresy spektrów odpowiedzi wyznaczonych z wibrogramów odpowiadających przejazdowi autobusów po pasie 1 (środek pasa w odległości 2.25 m od krawędzi jezdni) - rys.5.2.12 oraz przejazdowi autobusów przegubowych po tym samym pasie - rys.5.2.13.



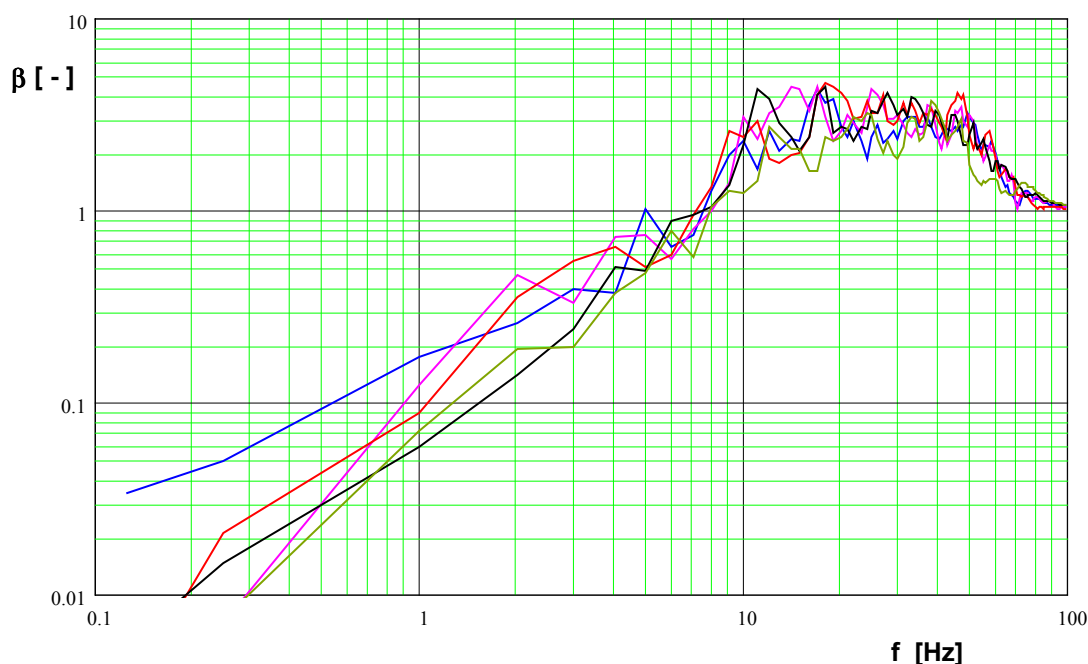
Rys.5.2.10 Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego z prędkością 70 km/h w przekroju A, odpowiadające drganiom zarejestrowanym we wszystkich trzech punktach pomiarowych.



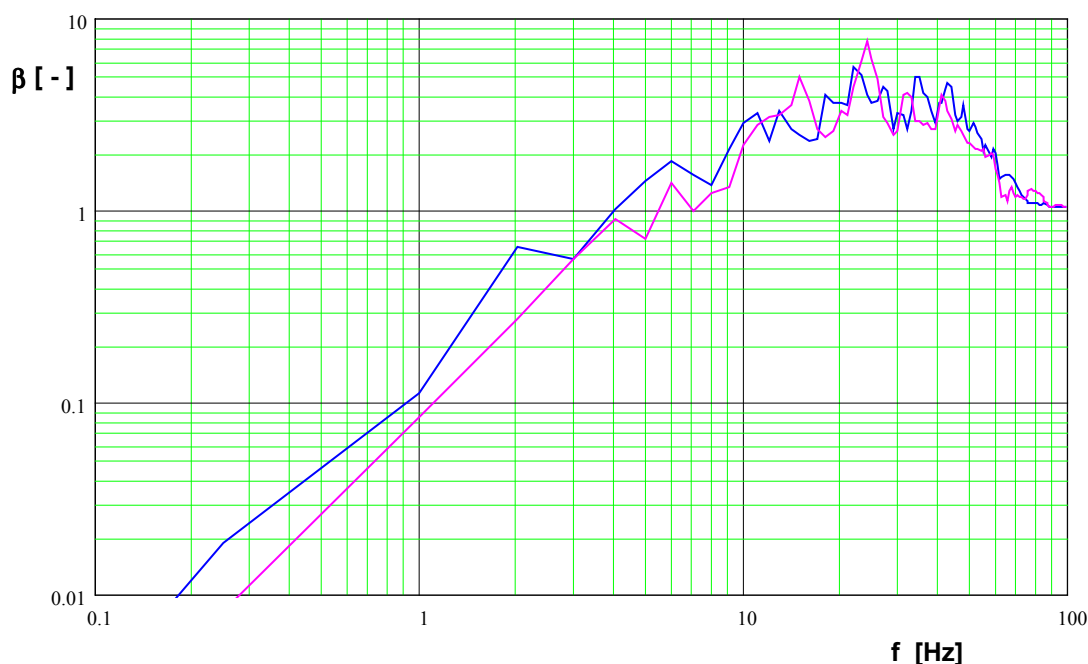
Rys. 5.2.11 Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego z prędkością 90 km/h w przekroju A, odpowiadające drganiom zarejestrowanym we wszystkich trzech punktach pomiarowych.

W obydwu przypadkach do wyznaczenia spektrum odpowiedzi wykorzystano wibrogramy zarejestrowane na krawędzi jezdni. Następne wykresy obrazują spektra odpowiedzi uzyskane z wibrogramów zarejestrowanych na fundamencie budynku, przy przejeździe autobusów i autobusów przegubowych (rys. 5.2.14 i 5.2.15). W przypadku przejazdów pojedynczych autobusów można zauważyć wzrost rzędnych spektrum odpowiedzi przy częstotliwościach poniżej 10 Hz i przy drganiach zarejestrowanych przez czujnik pomiarowy umieszczony na ścianie budynku. Takiego efektu nie zaobserwowano w

wykresach względnego spektrum odpowiedzi uzyskanych z wibrogramów odpowiadających przejazdowi autobusów przegubowych.



**Rys. 5.2.12** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojedynczych autobusów po pasie pierwszym, w przekroju B, wyznaczone z wibrogramów zarejestrowanych na krawędzi jezdni.

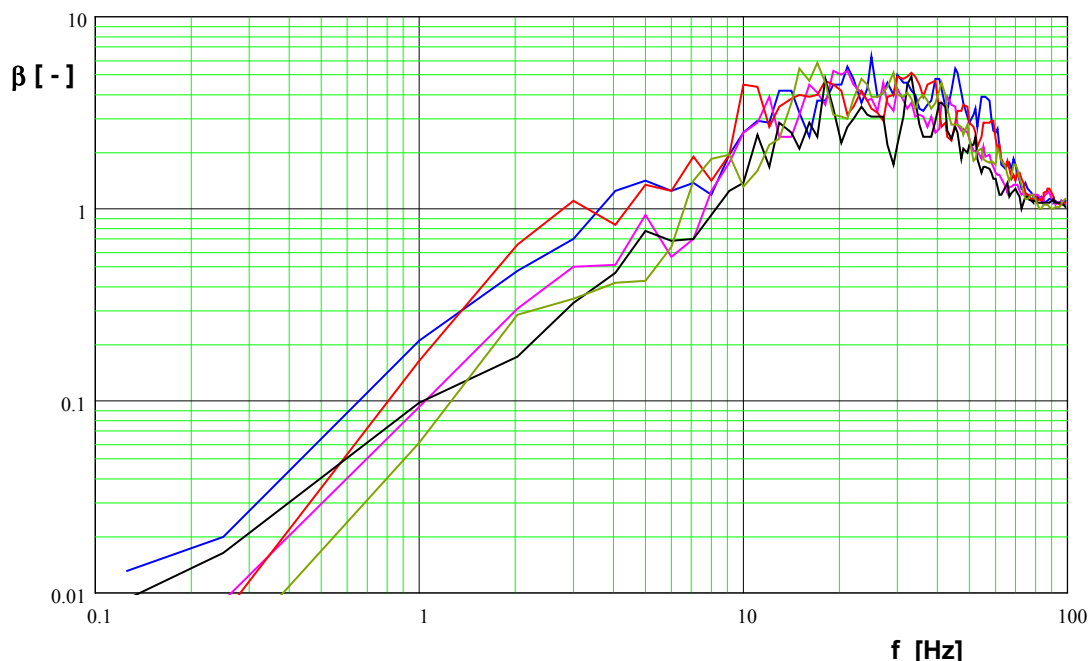


**Rys. 5.2.13** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojedynczych autobusów przegubowych po pasie pierwszym, w przekroju B, wyznaczone z wibrogramów zarejestrowanych na krawędzi jezdni.

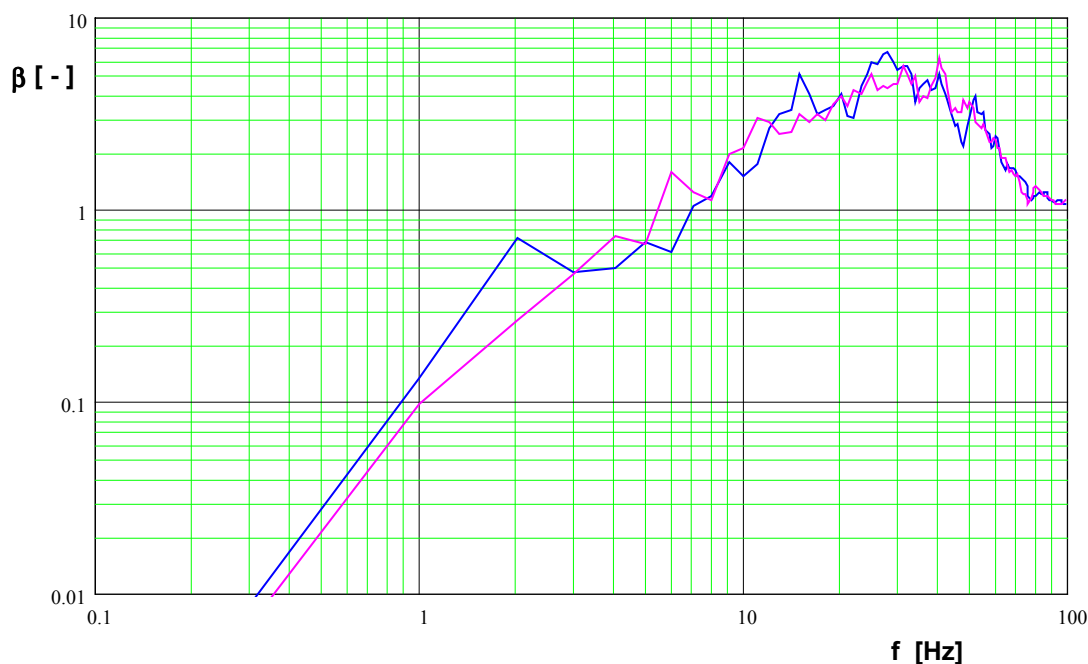
W przekroju pomiarowym C większość odnotowanych pojazdów ciężkich stanowiły samochody ciężarowe. Na wykresach przedstawiono przykładowe spektra odpowiedzi uzyskane z wibrogramów odpowiadających kolejnym punktom pomiarowym. Na rys. 5.2.16 podano względne spektra odpowiedzi drgań zarejestrowanych na krawężniku przy przejeździe pojedynczego samochodu ciężarowego.



Na kolejnym rys. 5.2.17 przedstawiono względne spektrum odpowiedzi przy przejeździe samochodów ciężarowych z przyczepami (naczepami). Oba rysunki odpowiadają przejazdom po pasie 1 (najbliższym punktom pomiarowym).



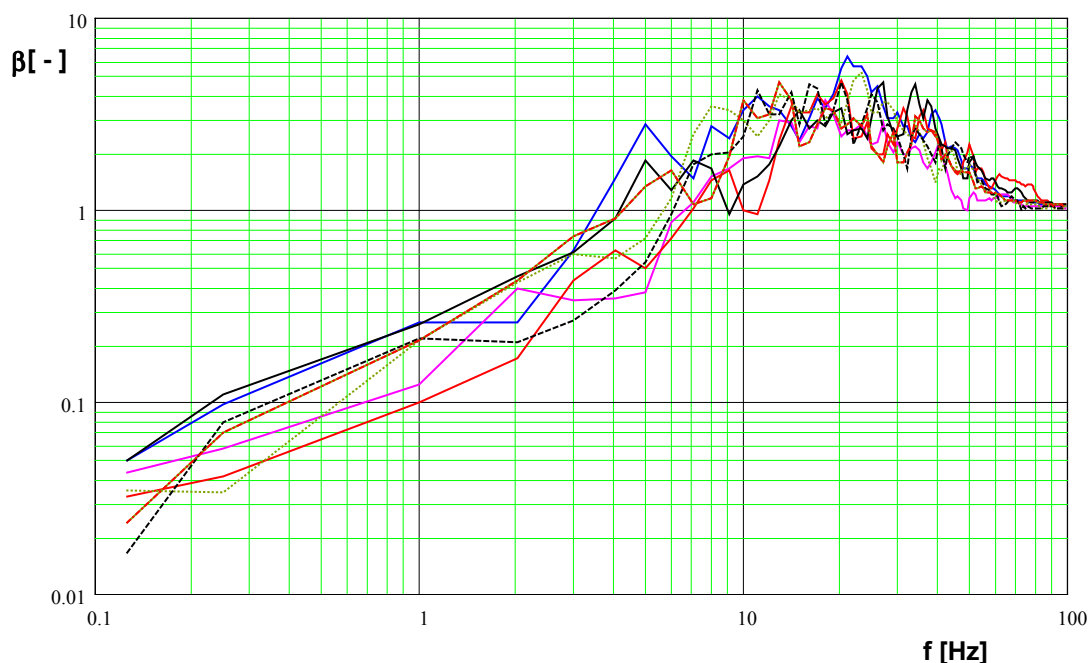
**Rys. 5.2.14** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojedynczych autobusów po pasie pierwszym, w przekroju B, wyznaczone z wibrogramów zarejestrowanych na fundamencie budowli.



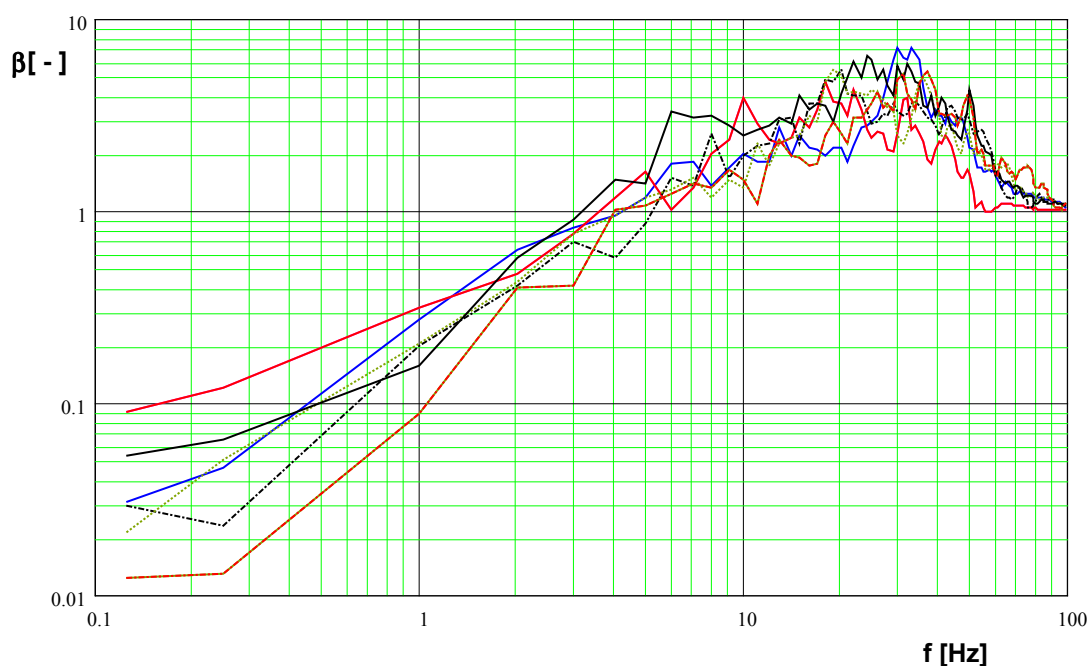
**Rys. 5.2.15** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojedynczych autobusów przegubowych po pasie pierwszym, w przekroju B, wyznaczone z wibrogramów zarejestrowanych na fundamencie budowli.

Przejazdy dwóch rodzajów pojazdów generują drgania, których spektra odpowiedzi w zakresie niższych częstotliwości są podobne. Różnice w wykresach pojawiają się w zakresie wyższych częstotliwości (powyżej 10 Hz). W tym przedziale rzędne spektrum odpowiedzi przy przejazdach pojazdów z przyczepami są większe.

Podjęta próba wykorzystania podanych wyżej i wielu innych wyników badań do oceny wpływu wybranych parametrów ruchowo-drogowych na przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi drgań drogowych nie dała oczekiwanych rezultatów. Problem jest bowiem wieloparametrowy.



**Rys.5.2.16** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojedynczych samochodów ciężarowych po pasie pierwszym, w przekroju C wyznaczone z wibrogramów zarejestrowanych na krawędzi jezdni.



**Rys. 5.2.17** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojedynczych samochodów ciężarowych z przyczepami (naczepami) po pasie pierwszym, w przekroju C wyznaczone z wibrogramów zarejestrowanych na krawędzi jezdni.

Zdecydowano się więc na zastosowanie SSN, przedstawionych już wcześniej w rozdz. 4, do skonstruowania modelu, który mógłby być wykorzystany do przeprowadzenia analizy wpływu różnych czynników ruchowo-drogowych na kształt przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych. Na podstawie przeglądu zastosowań SSN podanego w rozdz. 4 zdecydowano się na zastosowanie SSN ze wsteczną propagacją błędu. Najpoważniejszą zaletą tego typu sieci jest właściwość uwypuklania cech „makro” [56].

Pierwszą SSN była sieć #1. Zbudowano ją korzystając z wyników pierwszych pomiarów wykonanych w przekroju A podczas przejazdów pojazdu testowego. Sieć ta była traktowana jako pierwsze przybliżenie modelu umożliwiającego sprawdzenie przydatności SSN do rozwiązywania problemu analizowanego w niniejszej pracy.

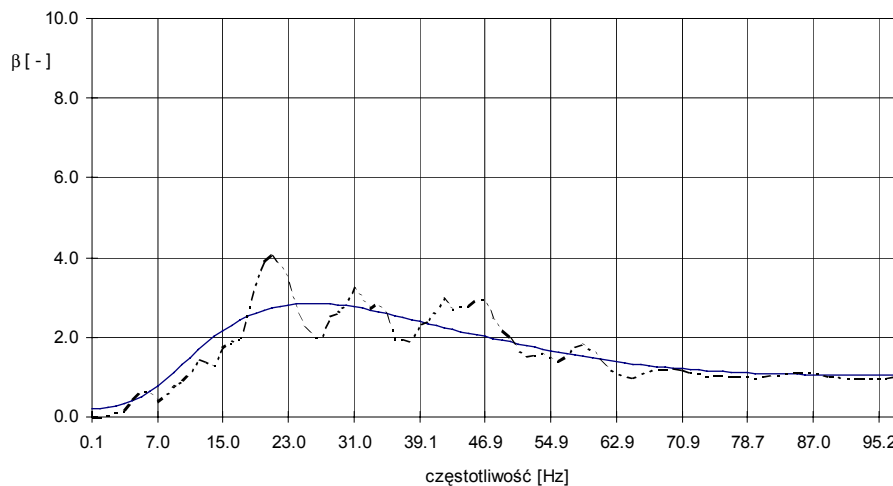
### 5.3 Kształtowanie architektury oraz uczenie i testowanie SSN

W rozważaniach dotyczących drgań drogowych jako parametry wejściowe do SSN przyjęto charakterystyczne informacje związane z pojazdami przejeżdżającymi przez przekrój: typ pojazdu, pas jazdy, prędkość przejazdu (średnia na badanym odcinku pomiarowym) oraz parametry związane z: usytuowaniem odbiornika drgań w badanym przekroju pomiarowym (odległość od krawędzi jezdni), umiejscowieniem czujnika pomiarowego (na gruncie albo na budowli) i wreszcie typem przekroju pomiarowego (określonym tu jako typ: A, B i C). Dodatkowo wprowadzono wartości dyskretne częstotliwości, którym odpowiadają wyznaczone rzędne spektrum odpowiedzi. Jako wielkości wyjściowe w kształtowanej sieci neuronowej przyjęto informacje o spektrum odpowiedzi drgań drogowych (wartość współczynnika  $\beta$  [ - ] odpowiadająca danej częstotliwości wejściowej oraz maksymalna amplituda przyspieszenia drgań). Wszystkie wielkości wejściowe i wyjściowe zostały znormalizowane. Poniżej scharakteryzowano SSN przyjmowane w kolejnych etapach rozwiązywania zagadnienia budowania modelu. Charakterystyka SSN podana została również w tablicy 5.3.1.

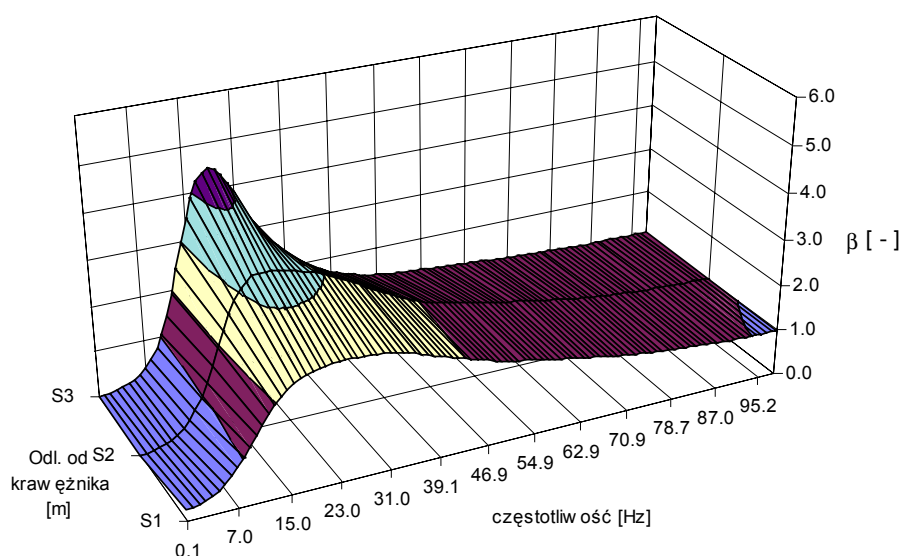
#### 5.3.1 SSN #1

W pracy [40], w której przedstawiono analizy odpowiadające przejazdom pustego pojazdu testowego przez przekrój A zastosowano sieć neuronową określoną tutaj jako #1. W tej sieci między warstwą wejściową i wyjściową umieszczono dwie warstwy ukryte po 16 neuronów każda. W warstwie neuronów wejściowych przyjęto 4 neurony, które odpowiadały kolejno: numerowi pasa ruchu, numerowi czujnika, częstotliwości i prędkości przejazdu pojazdu. Dwie pierwsze z informacji wejściowych charakteryzowały odległość czujnika od źródła drgań (środką pasa jazdy). Częstotliwość przyjmowano od wartości 0.125 Hz do 100 Hz. W warstwie neuronów wyjściowych umieszczono jeden neuron odpowiadający rzędnej względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy tłumieniu 2 %. W zbiorze wartości wejście/wyjście wyodrębniono podzbiór testujący, wybrany losowo. Stanowił on 10 % zbioru podstawowego. Sieć uczona była do osiągnięcia minimum lokalnego. Następnie z pomocą tak nauczonej sieci wyznaczono względne spektra odpowiedzi w warunkach występujących w pomiarach i porównano je ze spektrami doświadczalnymi. W przypadku omawianej sieci neuronowej #1, wykorzystanej w analizie spektrum odpowiedzi drgań wywołanych przejazdami pojazdu testowego, propagujących się w podłożu, stosowano nauczanie algorytmem wstecznej propagacji. Początkowe wagi dobrano arbitralnie na poziomie 0.3 dla każdego neuronu. Każdorazowo wagi te modyfikowane były przez zastosowanie współczynnika uczenia równego  $\eta = 0.05$ . Zbiór danych stanowiło 2700 próbek. Podzielono je w sposób losowy na podzbiór uczący i podzbiór testujący. Ten drugi stanowił 10 % całego zbioru danych, zebranych podczas analizy przebiegów czasowych. Dobieranie próbek w czasie uczenia odbywało się w sposób całkowicie losowy. Sieć #1 uczono do osiągnięcia minimum lokalnego przez 1603 epoki. i uzyskano minimalny błąd średni wynoszący 0.0026198 dla procesu uczenia i 0.0035384 dla testowania. Sieć dobrana w taki sposób miała 336 zmiennych współczynników wagowych. Średnio na jeden współczynnik wagowy przypadało około 7 próbek uczących. W wyniku przeprowadzonego procesu uczenia tak dobranej sieci pierwsza warstwa ukryta stanowiła rodzaj filtru neuronowego, powodującego wygładzanie powierzchni krzywych spektralnych.

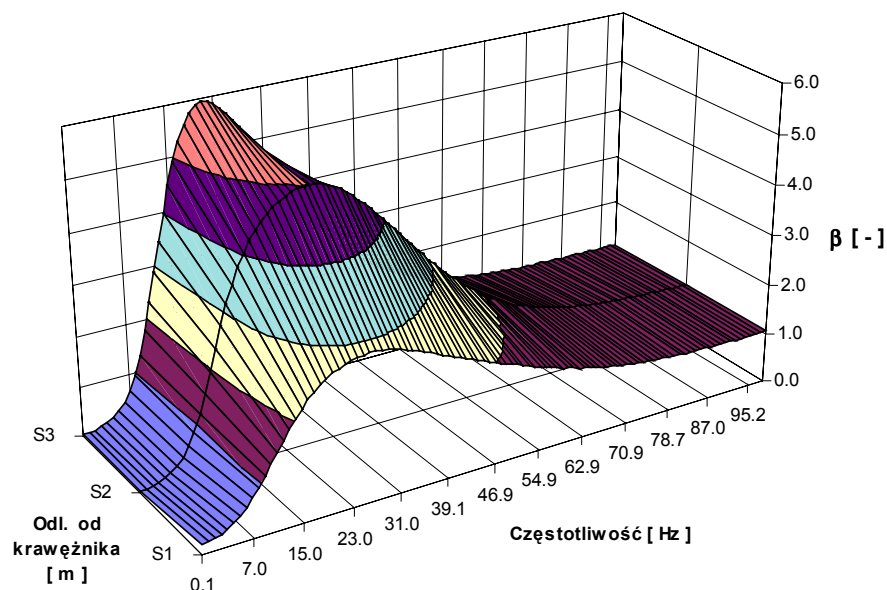
Sieć neuronowa zbudowana do analizy wyników przejazdu testowego po nauczaniu, na bazie informacji empirycznych, posłużyła jako symulator ograniczony w działaniu do jednego przekroju. Rys.5.3.1 przedstawia wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe pojazdu testowego po pasie pierwszym z prędkością 50 km/h, zarejestrowanego w przekroju A, a także projekcję tego spektrum przez sztuczną sieć neuronowa #1.



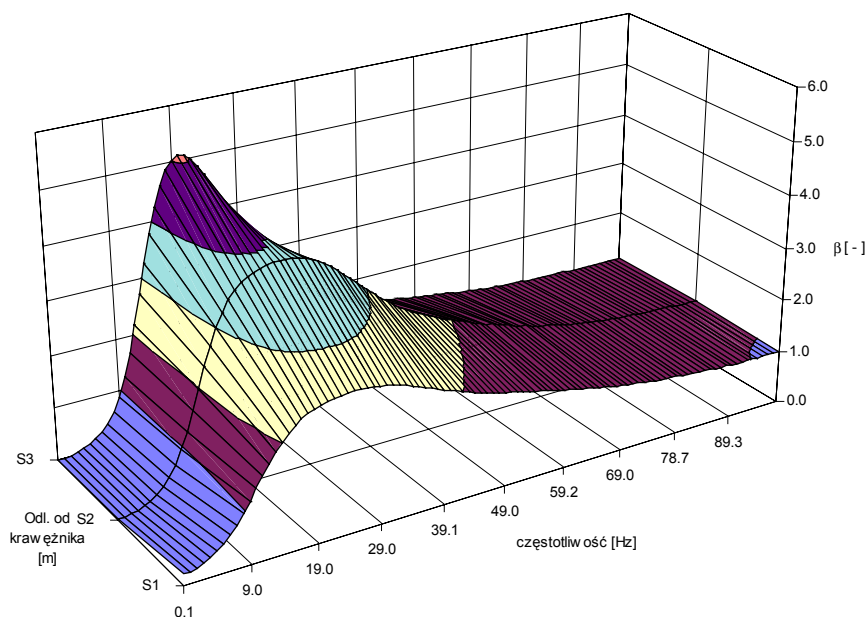
**Rys. 5.3.1** Względne przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi samochodu ciężarowego po pasie 1 z prędkością 50 km/h otrzymane z SSN #1 (linia ciągła) oraz z badań empirycznych (linia przerywana) na krawędzi drogi w przekroju A.



**Rys. 5.3.2** Względne przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi samochodu ciężarowego w przekroju A, po pasie 1 z prędkością 50 km/h dla poszczególnych czujników pomiarowych usytuowanych w gruncie, otrzymane z SSN #1.



**Rys. 5.3.3** Względne przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi samochodu ciężarowego w przekroju A, po pasie 1 z prędkością 70 km/h dla poszczególnych czujników pomiarowych usytuowanych w gruncie, otrzymane z SSN #1.



**Rys. 5.3.4** Względne przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi samochodu ciężarowego w przekroju A, po pasie 1 z prędkością 60 km/h otrzymane z SSN #1.

Na kolejnym wykresie przedstawiono względne przyspieszeniowe spektra odpowiedzi, które odpowiadają pomiarom zanotowanym w trzech punktach pomiarowych, ulokowanych na gruncie, przy prędkości przejazdu 50 km/h, a wyznaczonych przez SSN #1 (rys. 5.3.2). Rys. 5.3.3 przedstawia wykresy spektrów odpowiedzi przy przejeździe pojazdu z prędkością 70 km/h, po tym samym pasie, wyznaczonych za pomocą sieci #1. Oba wymienione wyżej wykresy odnoszą się do sytuacji ruchowych, które wystąpiły w trakcie badań. Rys. 5.3.4 obrazuje zaś symulowany przejazd pojazdu z prędkością 60 km/h wzdłuż pasa pierwszego. Spektra zostały wyznaczone przez SSN #1 w tych samych punktach pomiarowych. Tak otrzymane wykresy można wykorzystać w analizie wpływu różnych

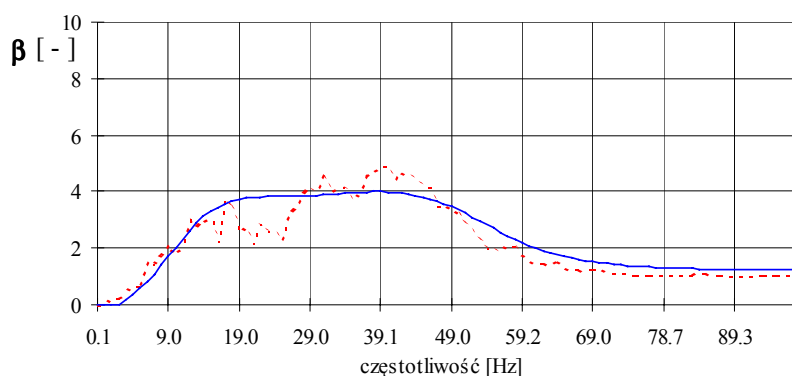
czynników na kształt wykresów. Tutaj np. (z rys. 5.3.4) widać wyraźnie, iż przedział dominujących częstotliwości ulega zawężeniu wraz ze zmianą odległości od pasa jazdy i tam też rzędne stają się dominujące.

### 5.3.2 SSN #2

Uwzględnienie dodatkowo wyników badań przeprowadzonych w przekroju B dały podstawę do zbudowania sieci #2. Sposób kształtowania SSN #2 opisano w [43]. Zastosowano tu również jednokierunkową sieć ze wsteczną propagacją błędu. Między warstwami wejściową i wyjściową umieszczono dwie warstwy ukryte złożone z 7 i 4 neuronów. W warstwie neuronów wejściowych przyjęto 5 neuronów, w których zawarte były informacje: o częstotliwości drgań, o pasie jazdy i przypisanym każdemu z pasów typie pojazdu i prędkości jego poruszania się. W warstwie neuronów wyjściowych umieszczono jeden neuron odpowiadający rzędnej względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. Informacje uzyskane z badań posłużyły do nauczania sieci.

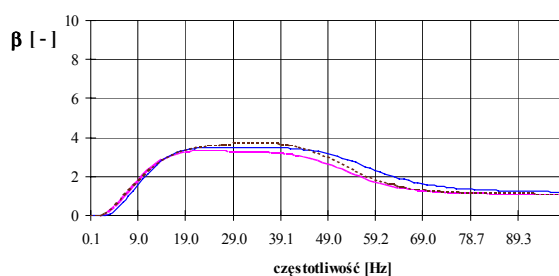
Podobnie jak poprzednio (sieć #1) badano zgodność spektrów wyznaczonych za pomocą SSN i uzyskanych z badań. Tak nauczoną i zweryfikowaną SSN można potem było zastosować do oceny wpływu zmiany parametrów charakteryzujących przejazd pojazdów na kształt i rzędne unormowanego spektrum odpowiedzi.

W analizach, w których wykorzystano informacje o przejazdach autobusów i autobusów przegubowych rejestrowanych w punkcie pomiarowym umiejscowionym na krawężniku jezdni, zastosowano sieć #2 uczoną techniką wstecznej propagacji z użyciem członu momentum. Wagi początkowe tak dobranej sieci przyjęto na poziomie identycznym jak poprzednio. Podobnie przyjęto też współczynnik uczenia każdej epoki. Dodatkowo przyjęty człon momentum charakteryzował się stałą wartością w każdym kroku i wynosił  $\alpha = 0.5$ . Podobnie też, jak w poprzednim przykładzie zbiór danych, wynoszący tutaj 2200 próbek, podzielono w sposób losowy na zbiór uczący - wynoszący około 80 % zbioru podstawowego, a także zbiór testujący 20 procentowy. W trakcie uczenia próbki były dobierane w sposób losowy tak, aby stopień generalizacji pozostał najbardziej obiektywny. Uczono sieć #2 przez 939 epok i uzyskano minimalny błąd uczenia równy 0.0029372, zaś błąd testowania wynosił 0.0037658. W opisanym wyżej przykładzie liczba zmiennych parametrów wagowych wynosiła 67. Zatem średnio przypadło około 26 próbek uczących na jeden współczynnik wagowy.

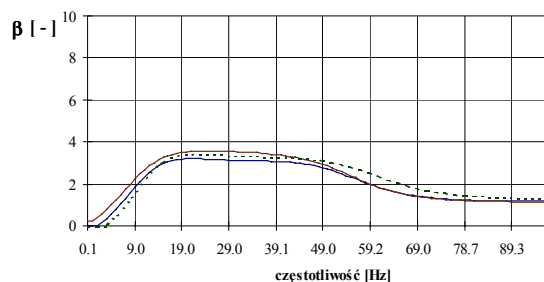


**Rys. 5.3.5** Względne przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi autobusów przegubowych po pasie 1 z prędkością 18.7 km/h i po pasie 2 z prędkością 32.9 km/h otrzymane z SSN #2 (linia ciągła) oraz z badań empirycznych (linia przerywana).

a)

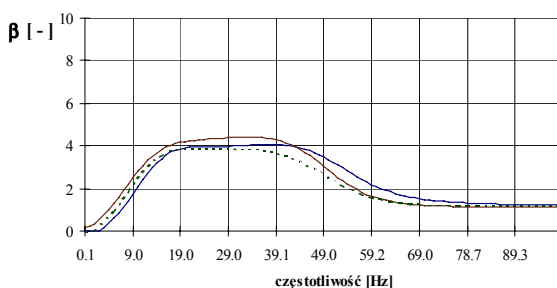


b)

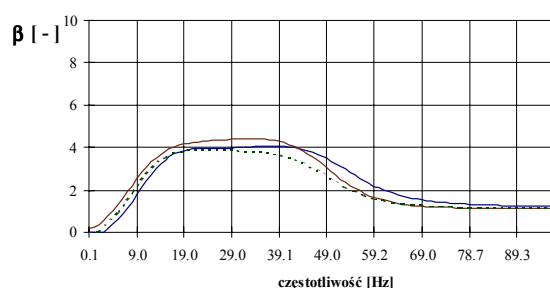


**Rys. 5.3.6** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdom pasem 1 autobusu z prędkością 20 km/h (rys.5.5.6a) i 40 km/h (rys.5.5.6b) przy jednoczesnym braku pojazdu na pasie drugim (linia 1), albo przejeździe autobusu po tym pasie z prędkością 40 km/h (linia 2), albo też przejeździe autobusu przegubowego po drugim pasie z prędkością 40 km/h (linia 3).

a)



b)



**Rys.5.3.7** Wykresy względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdom pasem 1 autobusu z prędkością 40 km/h (rys.5.5.6a) i 40 km/h (rys.5.5.6b) przy jednoczesnym braku pojazdu na pasie drugim (linia 1), albo przejeździe autobusu po tym pasie z prędkością 40 km/h (linia 2), albo też przejeździe autobusu przegubowego po drugim pasie z prędkością 40 km/h (linia 3).

Dane zebrane podczas badań przy regularnym ruchu drogowym pozwoliły na utworzenie symulatora, który mógł analizować zmiany spektrum odpowiedzi przy więcej niż jednym pojeździe, znajdującym się w przekroju pomiarowym. Pierwszy taki typ symulatora pozwalał na próbę oceny wrażliwości względnego spektrum odpowiedzi na zmiany badanych parametrów takich jak: liczba pojazdów w przekroju, typ pojazdów występujących w danej chwili, prędkości przejazdów, a także sprawdzenie relacji pomiędzy pasami przejazdu poszczególnych typów pojazdów. Na rys. 5.3.5 przedstawiono przykładowy wynik porównania odnoszący się do przejazdu zanotowanego w trakcie pomiarów. Linia przerywaną zaznaczono spektrum odpowiedzi uzyskane z badań, linią ciągłą zaś wyznaczone po nauczaniu SSN #2. Widoczna jest stosunkowo dobra zgodność otrzymanych wykresów.

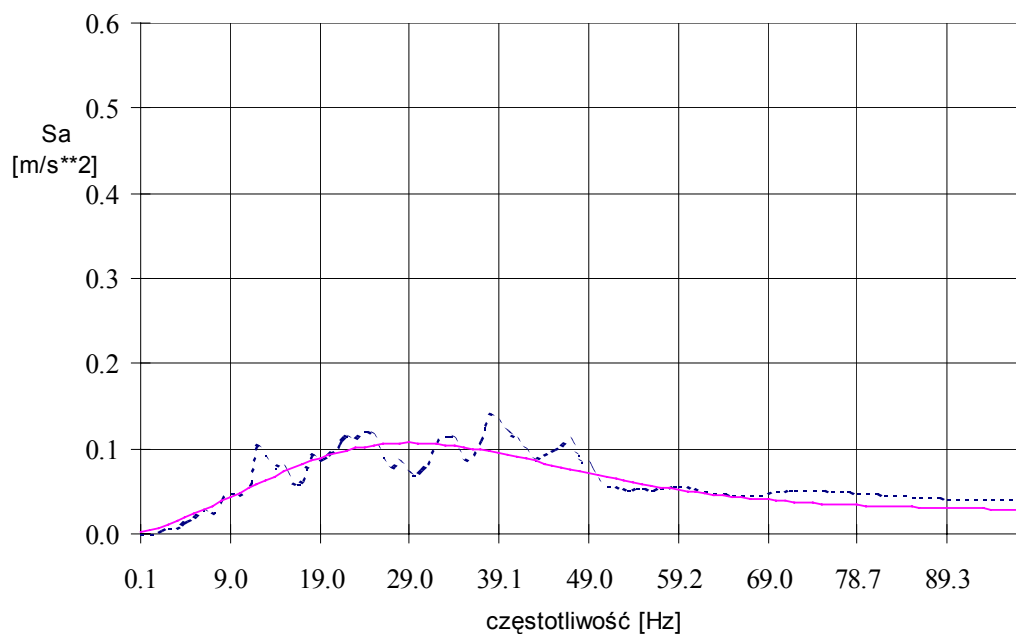
Sieć neuronowa po nauczaniu została wykorzystana do zbadania wpływu zmiany parametrów charakteryzujących przejazd pojazdów na kształt i rzędne spektralne. Wybrane z otrzymanych wykresów podano tu na rys. 5.3.6 i 5.3.7. Zestawione na rys. 5.3.6 wykresy dotyczą przejazdu pasem 1 autobusu z prędkością 20 km/h (rys.5.3.6a) i 40 km/h (rys.5.3.6b) przy jednoczesnym braku pojazdu na pasie drugim (linia 1), albo przejeździe autobusu po tym pasie z prędkością 40 km/h (linia 2), albo też przejeździe autobusu przegubowego po drugim pasie z prędkością 40 km/h (linia 3). Na rys. 5.3.7 przedstawiono wykresy odpowiadające przejazdowi po pasie pierwszym autobusu przegubowego z prędkością 20 km/h (rys.5.3.7a) oraz 40 km/h (rys.5.3.7b) przy identycznych z podanymi wyżej warunkami przejazdu po pasie drugim.

### 5.3.3 SSN #3

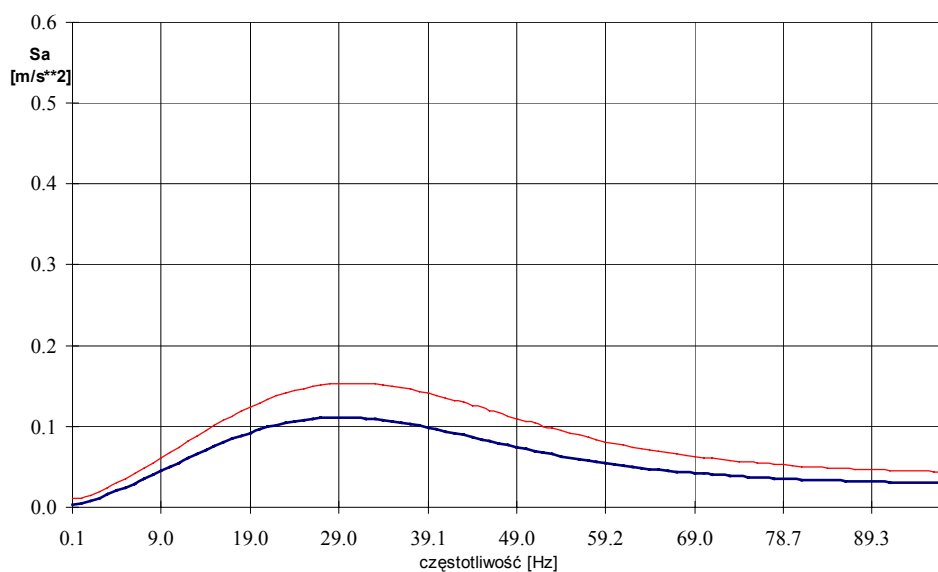
W dalszych badaniach zdecydowano się na kolejną rozbudowę SSN. W pracach [42], [44] przedstawiono wyniki analizy przeprowadzonej za pomocą SSN a dotyczącej przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi w punkcie pomiarowym usytuowanym na krawędzi jezdni. Tym razem zastosowano sieć przyjmując w warstwie wejściowej i wyjściowej liczbę neuronów taką samą jak w sieci #2, w warstwie pośredniej zaś zastosowano jedną warstwę ukrytą, którą stanowiło 25 neuronów. Dane wyjścia stanowiły rzędne przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. SSN #3 zbudowano opisując, podobnie jak poprzednio, osiem możliwych sytuacji ruchowych, dopuszczonych w badanym przekroju, z udziałem obu rodzajów autobusów. W tym przypadku, podobnie jak poprzednio sieć #3 uczona była algorytmem wstecznej propagacji z udziałem momentum. Tutaj jednak przyjęto dynamicznie zmienny współczynnik momentum. Początkowe funkcje wagowe pozostały na tym samym poziomie równym 0.3. Wartość początkową momentum ustalono na poziomie  $\alpha = 0.5$ . Współczynnik nauczania w kolejnej epoce wynosił  $\eta = 0.05$ , zaś człon momentum zmniejszał się o 0.000025 w każdej epoce. Ogółem zaprogramowano 2000 epok uczących. Do nauczania sieci #3 dobrano losowo 1831 próbek, zaś do testowania pozostałe 369 czyli około 15 %. Podobnie jak poprzednio dobieranie próbek odbywało się w sposób losowy. Nauczana w ten sposób sieć osiągnęła błąd minimalny po 994 epokach. Wyniósł on 0.0046249. Minimalny błąd testowania osiągnięto po 1931 epokach i wyniósł on 0.0054973. Tym razem liczba współczynników wagowych wyniosła 150. Na jedną zmienną wagę przypadało więc około 12 próbek.

Na rys. 5.3.8 przedstawiono przykładowe rezultaty odnoszące się do badań przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. Linia przerywaną zaznaczono spektrum odpowiedzi uzyskane z badań, linią ciągłą zaś wyznaczone po nauczaniu SSN #3. I znów widoczna jest stosunkowo dobra zgodność otrzymanych wykresów. SSN #3 po nauczaniu pozwoliła na zbadanie wpływu zmiany parametrów charakteryzujących przejazd pojazdów na kształt i rzędne przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. Zestawione na rys. 5.3.9 wykresy dotyczą przejazdu pasem 1 autobusu z prędkością 20 km/h przy jednoczesnym braku pojazdu na pasie drugim (linia dolna), albo przejeździe autobusu przegubowego po tym pasie z prędkością 40 km/h (linia górna). Na rys. 5.3.10 przedstawiono wykresy odpowiadające przejazdowi po pasie pierwszym autobusu z prędkością 40 km/h (linia dolna) i tego samego pojazdu przy jednoczesnym przejeździe pasem drugi autobusu przegubowego z identyczną prędkością (linia górna). Z kolei na rys. 5.3.11 wykresy dotyczą przejazdu pasem 1 autobusu przegubowego z prędkością 20 km/h przy jednoczesnym braku pojazdu na pasie drugim (linia dolna), albo przejeździe autobusu po drugim pasie z prędkością 40 km/h (linia górna). Na rys. 5.3.12 przedstawiono wykresy odpowiadające przejazdowi po pasie pierwszym autobusu przegubowego z prędkością 40 km/h (linia dolna) i tego samego pojazdu przy jednoczesnym przejeździe pasem drugim autobusu z tą samą prędkością (linia górna). Rys. 5.3.13 ilustruje zaś przejazd autobusu po pasie drugim z prędkością 40 km/h, przy wolnym pasie pierwszym (linia dolna) i przejazd autobusu przegubowego z tą samą prędkością i po tym samym pasie (linia górna).

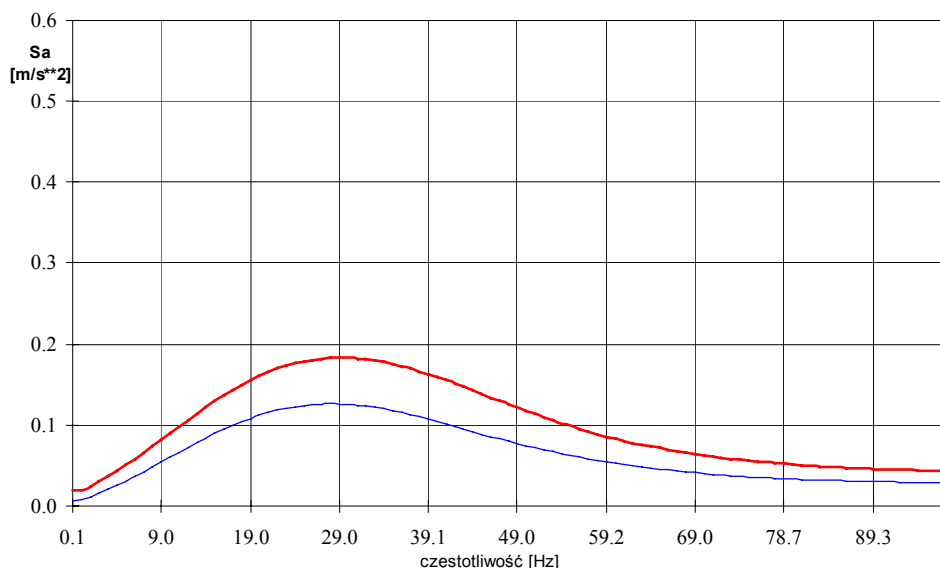




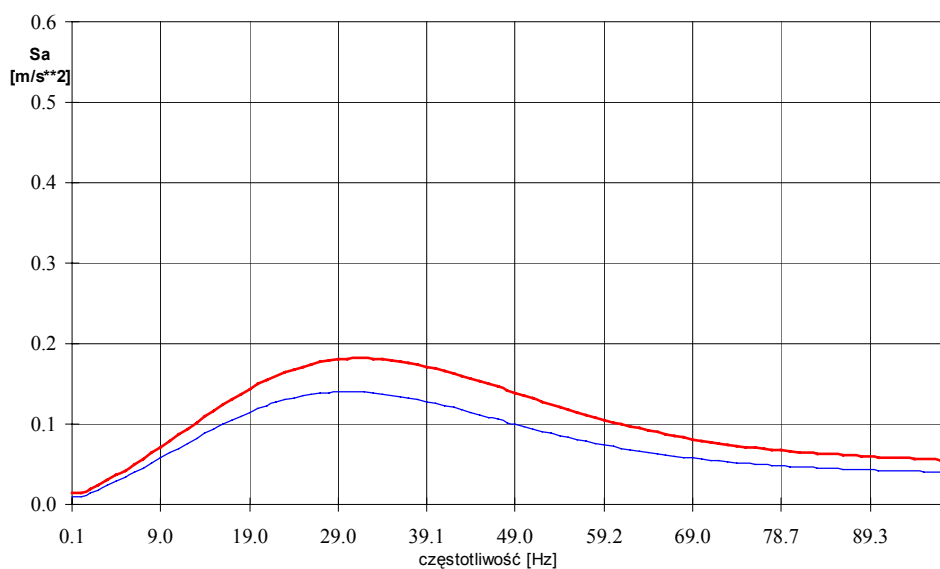
**Rys.5.3.8** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi autobusu po pasie 1 z prędkością 17.6 km/h otrzymane z SSN #3 (linia ciągła) oraz z badań empirycznych (linia przerywana).



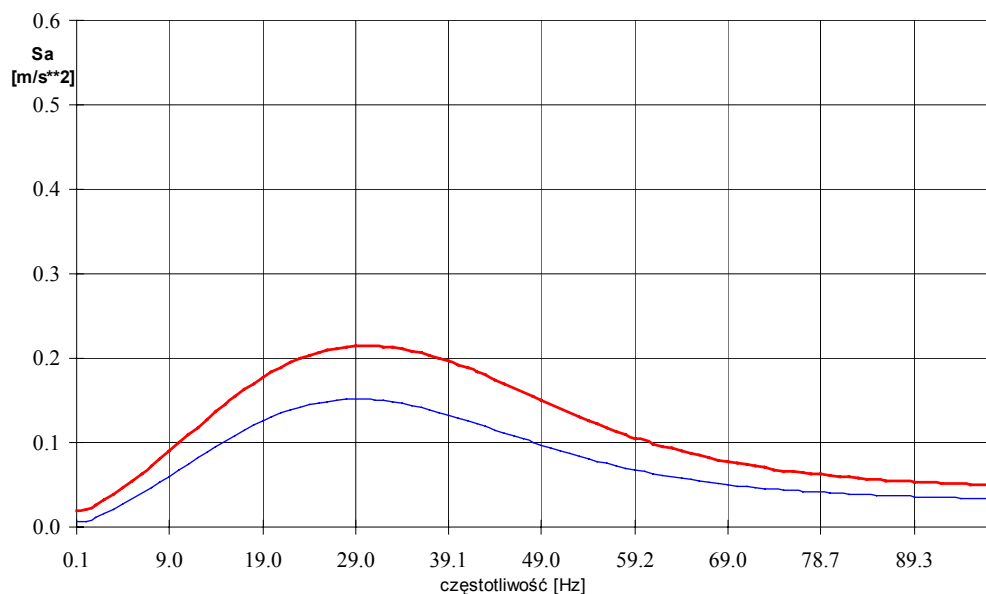
**Rys.5.3.9** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi autobusu po pasie 1 z prędkością 20 km/h (linia dolna) oraz przejazdowi tego samego autobusu przy jednoczesnym przejeździe pasem 2 autobusu przegubowego z prędkością 40 km/h (linia górna) otrzymane z SSN #3.



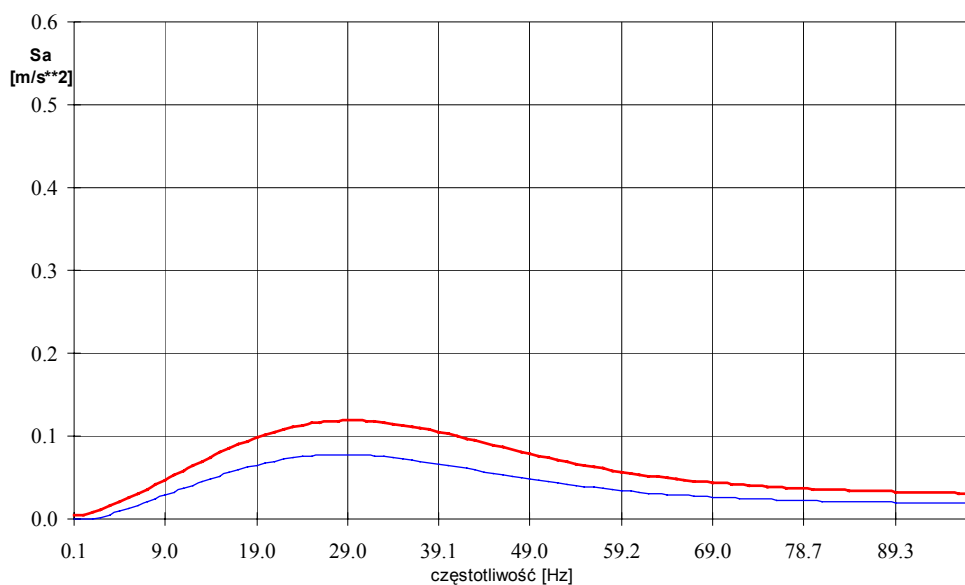
**Rys. 5.3.10** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi autobusu przegubowego pasem 1 z prędkością 20 km/h (linia dolna) oraz przejazdowi tego samego autobusu przy jednoczesnym przejeździe pasem 2 autobusu z prędkością 40 km/h (linia górna) otrzymane z SSN #3.



**Rys. 5.3.11** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi autobusu pasem 1 z prędkością 40 km/h (linia dolna) oraz przejazdowi tego samego autobusu przy jednoczesnym przejeździe pasem 2 autobusu przegubowego z prędkością 40 km/h (linia górna) otrzymane z SSN #3.



**Rys. 5.3.12** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi autobusu przegubowego pasem 1 z prędkością 40 km/h (linia dolna) oraz przejazdowi tego samego autobusu przy jednoczesnym przejeździe pasem 2 autobusu z prędkością 40 km/h (linia górna) otrzymane z SSN #3.



**Rys. 5.3.13** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi autobusu po pasie 2 z prędkością 40 km/h (linia dolna) oraz przejazdowi pasem 2 autobusu przegubowego z prędkością 40 km/h (linia górna) otrzymane z SSN #3.

#### 5.3.4 SSN #4

Praktyczne wykorzystanie względnych przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi w obliczeniach budowli może nastąpić wówczas, gdy jednocześnie informacje w nich zawarte uzupełni się o odpowiadające im wartości maksymalnych przyspieszeń drgań. Ocenę maksymalnych wartości przyspieszenia drgań, odpowiadających różnym warunkom ruchowo-drogowym przedstawiono w pracy [45]. Wykorzystano do tej analizy SSN #4. W sieci #4 użyto jako wielkości wyjściowych dwóch informacji: maksymalnej wartości

przyspieszenia zarejestrowanej w wibrogramie oraz rzędnej względnego spektrum odpowiedzi przypisanej danej częstotliwości. Zdecydowano się rozdzielić informacje o maksymalnej wartości przyspieszenia w wibrogramie oraz o rzędnych względnego spektrum odpowiedzi z myślą o ewentualnym wykorzystaniu wyników przy określeniu modelowego spektrum. Zamierzano bowiem ocenić także czy i w jakim stopniu struktura częstotliwościowa spektrum odpowiedzi zależy od parametrów ruchowych. Wielkości wejściowe w SSN #4 zawierają charakterystyczne informacje rejestrowane podczas badań w przekrojach pomiarowych A, B i C. Dotyczą one poszczególnych typów pojazdów albo ich kombinacji, występujących się w trakcie pomiarów, ich cech charakterystycznych oraz wielkości określające poszczególne przekroje; położenia akcelerometrów i miejsca ich usytuowania (np. na gruncie czy budowli w danym przekroju). Ogółem wprowadzono za każdym razem po 30 takich parametrów. Sieć #4 uczona była z użyciem algorytmu wstecznej propagacji z członem momentum. Podobnie jak poprzednio tutaj przyjęto  $\eta = 0.05$  i  $\alpha = 0.5$ , zaś początkowe współczynniki wagowe - jako równe 0.3. Zbiór danych stanowiło 16 000 próbek. Podzielone zostały one losowo na podzbiory trenujący i testujący. Stanowiły one - 85 % całości próbek zbiór trenujący i 15 % testujący. Uczona sieć #4 osiągnęła błąd minimalny po 2040 epokach i wynosił on przy danych trenujących 0.0022408. Liczba zmiennych współczynników wagowych wynosiła 4100. Przy tak dobranej topologii sieci na jeden zmienny współczynnik przypadało ponad 3 próbki.

Pomimo, iż SSN #4 odpowiadają najniższe średnie błędy uczenia i testowania, to wyniki uzyskane przy jej pomocy okazały się być niezadowolające. SSN #4 wskutek nadmiernego dopasowania się do próbek uczących nie wykazała dobrych właściwości uogólniających.

### 5.3.5 SSN #5, #6 i #7

Poszukiwania prawidłowego dostosowania wielkości obliczonych do pomierzonych zarówno w odniesieniu do spektrum względnego, jak i przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi skłoniły do wprowadzenia pewnych nowych wielkości do SSN. W sieciach opisanych jako #5, #6, #7 zastosowano, jako dodatkowe wielkości wyjścia, dwie miary globalne określające przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi oraz spektrum względne wg wzorów:

$$a_1 = \int_{\omega_p}^{\omega_k} S_a(\omega) d\omega \quad (5.3.1)$$

$$a_2 = \int_{\omega_p}^{\omega_k} \beta(\omega) d\omega \quad (5.3.2)$$

Takie informacje dostarczone SSN pozwoliły na lepsze uogólnienie oraz zapewniły stabilność uzyskanych wyników. Jeśli dodatkowo do zbioru danych wejściowych dodano współczynniki miary globalnej spektrum unormowanego i spektrum przyspieszeniowego przyjęte według wzorów 5.3.1 i 5.3.2, to przy początkowych parametrach wag przyjętych analogicznie jak w poprzednich sieciach ponownie losowano podział na zbiory uczący i testujący dla sieci ze wsteczną propagacją błędów z członem momentum (dla  $\alpha = 0.5$ ). Uczona sieć #5 miała tym razem 6936 zmiennych współczynników wagowych. Liczba próbek uczących przypadających na każdy zmienny współczynnik wagowy wyniosła około 2. Podzbiór trenujący stanowił ok. 90 % zbioru danych a pozostałe 10 % posłużyło do testowania sieci #5. Uczenie odbywało się za pomocą analogicznego jak poprzednio losowego doboru próbek. Zastosowano dwa podejścia, co do sposobu uczenia: pierwsze uczenie zostało przerwane po osiągnięciu pewnego minimum lokalnego w stosunkowo krótkim czasie (sieć #5); by następnie ponownie dokonać losowego podziału na podzbiory uczący i testujący i znowu podjąć uczenia (sieć #6). Odbywało się to w analogicznych warunkach jak uprzednio, tym razem jednak w dłuższym okresie czasu. W stosunku do poprzednio prowadzonego procesu nauczania liczba epok w kolejnym podejściu wzrosła

około dziesięciokrotnie (w chwili otrzymania kolejnego lokalnego minimum błędu). Jednakże wyniki osiągnięte w procesie testowania obu sieci nieznacznie tylko różniły się (por. tab. 5.3.2). Porównanie zaś wyników symulacji obydwoma sieciami wskazywało na nieznaczne różnice w kształcie krzywych spektralnych (por. [45]). Wzrosły zaś wielkości maksymalnych wartości przyspieszeń drgań w symulowanych przekrojach (patrz tab. 5.3.2).

Znaczna różnica w liczbie nauczanych epok nie przełożyła się na istotne różnice w sposobie aproksymacji oczekiwanych wartości wyjściowych (nawet przy takiej dużej zmianie wartości średnich błędów trenowania i testowania). W tabelicy 5.3.1 zestawiono informacje o uzyskanych błędach uczenia i błędach testowania.

**Tabela 5.3.1** Charakterystyka SNN stosowanych w analizie drgań drogowych.

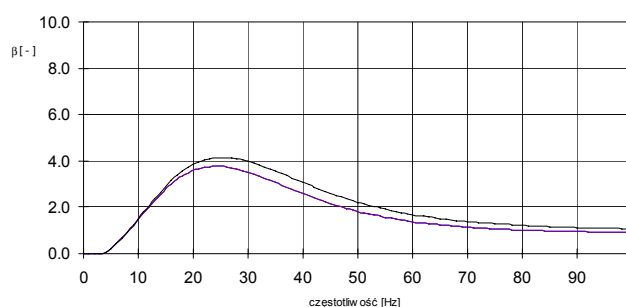
Nr SSN	Liczba neuronów w poszczególnych warstwach SSN			Liczba epok uczących	Błąd uczenia $\sqrt{E_{MSE}}$ [%]	Błąd testowania $\sqrt{E_{MSE}}$ [%]
	wejście	warstwy ukryte	wyjście			
#1	4	16-16	1	1603	5.12	5.95
#2	5	7-4	1	939	5.42	6.14
#3	5	25	1	994	6.80	7.41
#4	30	50-50	2	2040	4.73	4.83
#5	30	68-68	4	154	9.43	8.64
#6	30	68-68	4	1522	6.02	5.35
#7	30	68-68	6	974	7.40	6.55

Już wcześniej wspomniano, że w tabelicy 5.3.2 zestawiono przykładowe wyniki obliczeń uzyskane za pomocą sieci #5 i #6 oraz uzyskane z badań przy tych samych parametrach ruchowo-drogowych. Sieci te wykorzystano następnie jako symulatory w analizach przejazdów pojedynczych pojazdów opisanych w tabelicy 5.3.3. Poszczególne wykresy względnych spektrów odpowiedzi uzyskane w nowych warunkach prognozowanych (opisanych w tabelicy 5.3.3) przedstawiono na rys. 5.3.14, 5.3.15 oraz 5.3.16.

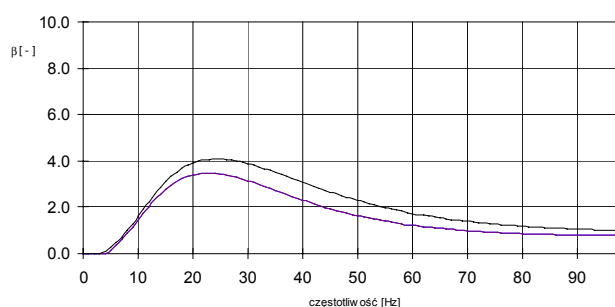
**Tabela 5.3.2** Porównanie maksymalnych wartości przyspieszeń w wibrogramach otrzymanych z pomiarów w punkcie pomiarowym na krawędzi drogi oraz wartości uzyskanych za pomocą SSN.

Nr	Typ pojazdu poruszającego się po pasie pierwszym	Badany przekrój	Prędkość [km/h]	Maksymalne przyspieszenie [cm/s <sup>2</sup> ]		
				pomierzone	obliczone przez SSN#5	obliczone przez SSN#6
1	Sam. Ciężarowy	C	26.2	1.92	2.28	2.33
2	Sam. Ciężarowy	C	47.4	3.10	3.26	3.59
3	Sam. Ciężarowy	A	50.0	9.37	9.11	9.43
4	Autobus	B	31.0	3.75	3.34	3.45
5	Autobus przegubowy	B	22.8	3.43	3.30	3.39
6	Sam. Ciężar. z przyczepą	C	49.7	1.60	1.92	1.62

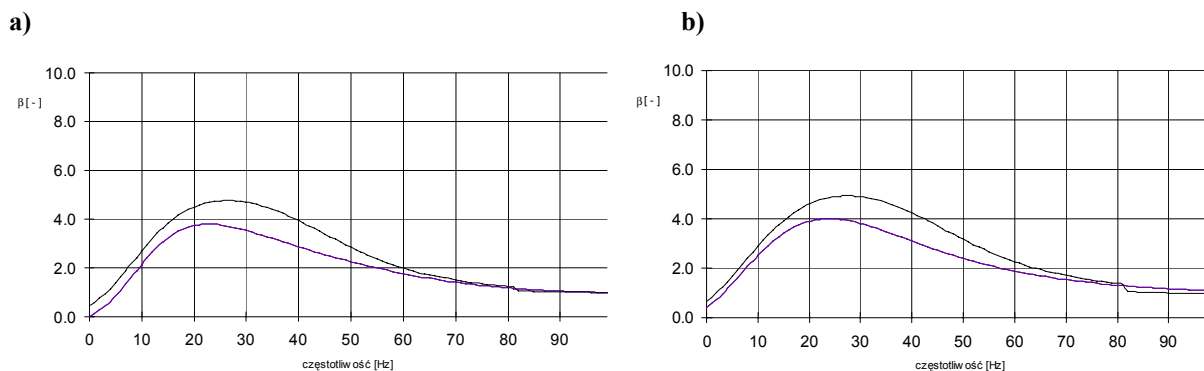
a)



b)



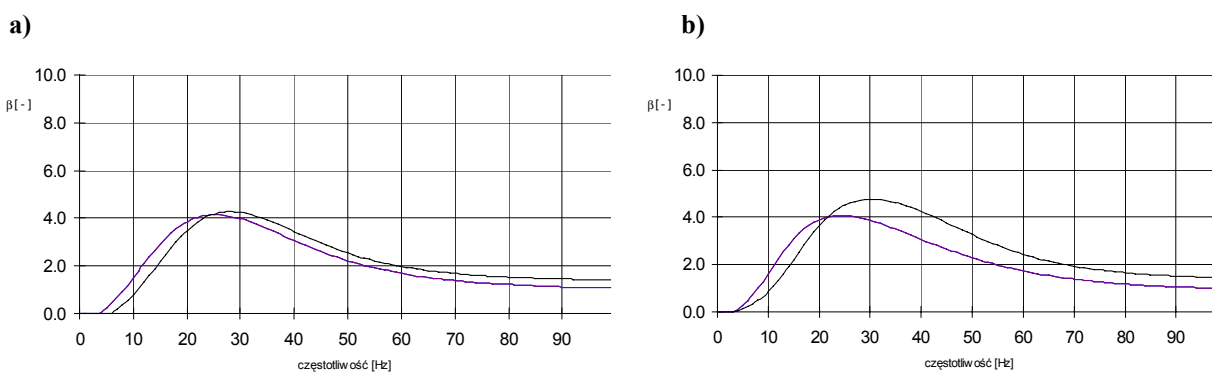
**Rys. 5.3.14** Względne spektra odpowiedzi uzyskane w przekroju A w punkcie na gruncie w odległości 3 metrów od krawędzi jezdni, przy przejeździe samochodu ciężarowego pasem 1w przekroju A z prędkością 40 (linia dolna) i 60 km/h (linia górna). Obliczenia dokonano za pomocą SSN #5 (rys. a) i SSN #6 (rys. b).



**Rys. 5.3.15** Względne spektra odpowiedzi uzyskane w miejscu odbioru drgań na gruncie w przekroju B w odległości 3 metrów od krawędzi jezdni, przy przejeździe pasem 1 autobusu przegubowego (linia dolna) i autobusu (linia górna) w przekroju B z prędkością 40 km/h. Obliczenia dokonano za pomocą SSN #5 (rys. a) i SSN #6 (rys. b).

**Tablica 5.3.3** Porównanie wyników otrzymanych przy zastosowaniu SSN #5 i #6 w punkcie położonym na gruncie 3 metry od krawędzi jezdni.

Nr	Typ pojazdu poruszający się po pasie pierwszym	Badany przekrój	Prędkość [km/h]	Maksymalne przyspieszenie [cm/s <sup>2</sup> ] obliczone	
				przez SSN#5	przez SSN#6
1	Sam. Ciężarowy	A	40	2.05	2.50
2	Sam. Ciężarowy	A	60	2.21	2.59
3	Autobus	B	40	2.42	2.78
4	Autobus przegubowy	B	40	2.53	2.67
5	Sam. Ciężarowy	C	60	2.36	2.86
6	Sam. Ciężar. z przyczepą	C	60	1.69	1.72



**Rys. 5.3.16** Względne spektra odpowiedzi uzyskane w miejscu odbioru drgań na gruncie w odległości 3 metrów od krawędzi jezdni w przekroju A, przy przejeździe samochodu ciężarowego z przyczepą (linia dolna) i samochodu ciężarowego (linia górna) pasem 1 z prędkością 60 km/h. Obliczenia dokonano za pomocą SSN #5 (rys. a) i SSN #6 (rys. b).

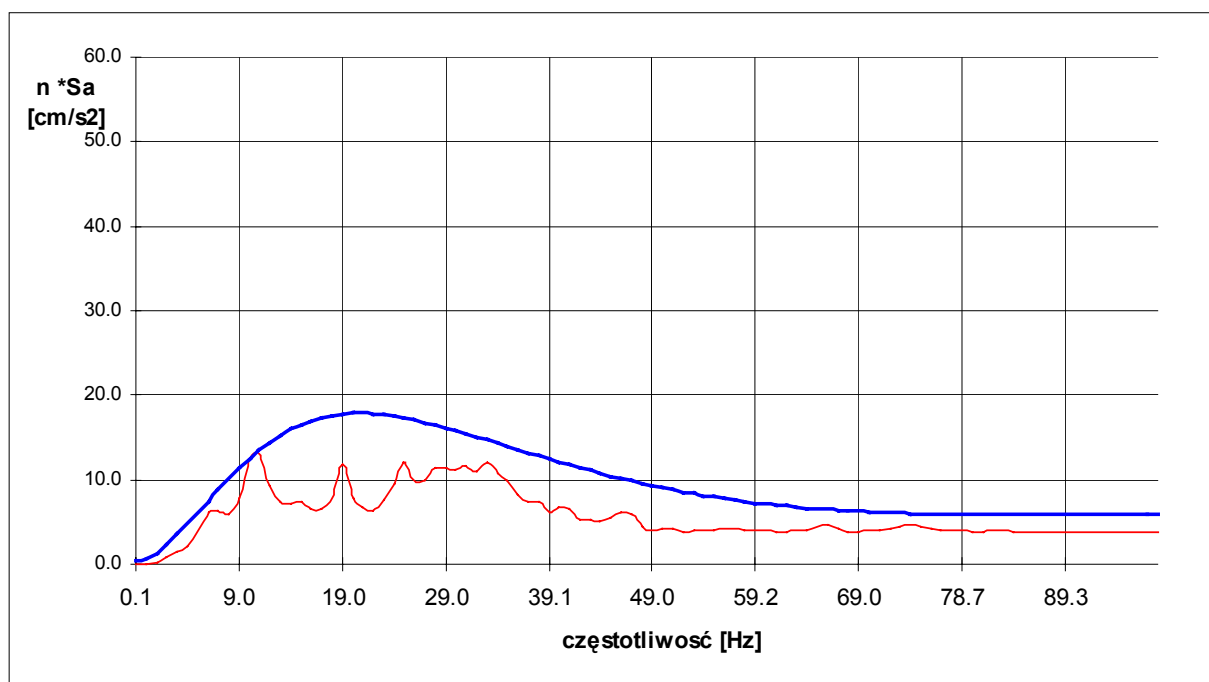
Z przedstawionych wykresów widać, że tak zbudowane sieci, uśredniają wyniki otrzymane w procesie nauczania (por. np. rys. 5.3.1, 5.3.8). W obliczeniach projektowych i diagnostycznych istotne jest to, aby przyjmowane wartości obciążeń ograniczały od góry wartości prognozowane. Z tego założenia wynika koncepcja wprowadzenia do uśrednionego spektrum odpowiedzi takiej jego modyfikacji, aby wykres rzeczywistego (uzyskanego z badań) spektrum odpowiedzi pomieścił się pod krzywą uzyskaną z obliczeń z użyciem modelu budowanego przy pomocy SSN. Modyfikacje wprowadzono przez zastosowanie współczynników powiększenia. Zasadę szczegółowo przedstawiono w pracy [46]. Wartość takiego współczynnika odpowiadającego danemu spektrum odpowiedzi uzyskuje się ze stosunku: maksymalnej rzędnej względnego spektrum odpowiedzi wyznaczonego doświadczalnie na podstawie zarejestrowanych drgań do rzędnej odpowiadającej we względnym spektrum odpowiedzi wyznaczonej z użyciem SSN #5 i #6. Współczynnik taki definiuje się wzorem:

$$n_i = \frac{\beta_{\max}(\omega)}{\beta_{\text{SSN}_i}(\omega)} \quad [-] \quad (5.3.3)$$

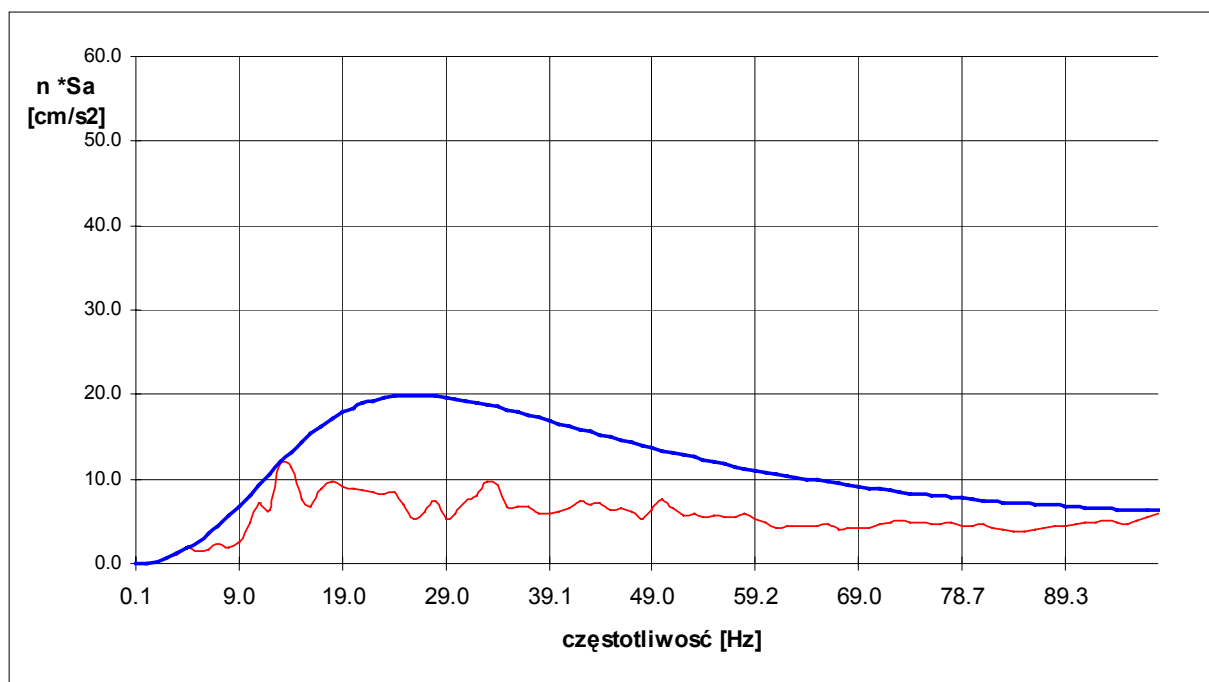
Uzyskane w ten sposób wartości były kolejnymi informacjami wprowadzonymi do nowej sieci #7. Spektrum odpowiedzi, które określa maksymalne wartości poddanego wymuszeniom oscylatora o jednym stopniu swobody stanowi, w tych wymienionych wyżej przykładach, pewien aproksymator wartości średnich obliczonych w stosunku do uzyskanych na podstawie wyników doświadczalnych. Okazuje się jednak, że wartości maksymalne z przebiegów doświadczalnych mogą niekiedy przekroczyć linie spektralne uzyskane w wyniku symulacji. Z tego względu w kolejnym kroku analizy wpływu drgań drogowych wprowadzono, jako dodatkowe informacje do sieci neuronowej, wartości uzyskane podczas uczenia sieci #5 i #6 opisanych poprzednio, zgodnie ze wzorem 5.3.3. Zatem skutek dodatkowego "wstępnego" przetworzenia danych z użyciem dwóch sieci powstała sieć neuronowa o topologii (30-68-68-6). Tak zbudowaną sztuczną sieć neuronową uczono ponownie stosując losowe sposoby podziału oraz losowy dobór danych podczas procesu trenowania. Cykl uczenia sieci #7 zawierał liczbę epok uczących równą 974 - pośrednią w stosunku do poprzednich dwóch. Przy tej liczbie epok minimum błędu uczenia wyniosło 0.0054690, zaś błędu testowania 0.0042869.

**Tablica 5.3.4** Charakterystyczne informacje o niektórych parametrach przejazdów wprowadzonych do SSN #7.

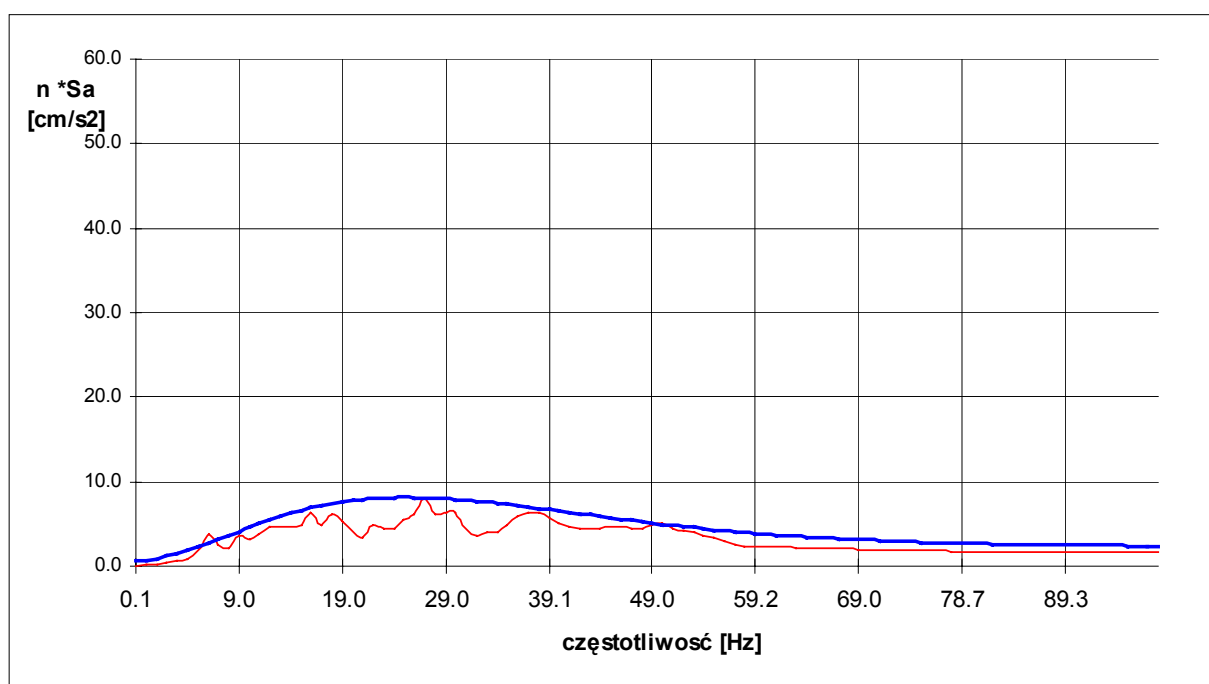
Nr	Typ i prędkość pojazdu poruszającego się po pasie:		Badany przekrój	Odległość od krawędzi jezdni [m]
	pierwszym [km/h]	drugim [km/h]		
1	x	Samochód ciężarowy – 50.0	A	0.0
2	Samochód ciężarowy – 57.8	x	C	0.0
3	Samochód ciężar. z przyczepą – 49.7	x	C	0.0
4	Autobus przegubowy – 49.9	Autobus przegubowy – 36.0	B	2.0
5	Autobus – 20.4	Autobus – 31.6	B	2.0



**Rys. 5.3.17** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi samochodu ciężarowego w przekroju A po pasie 2 z prędkością 50.0 km/h otrzymane z SSN #7 (linia niebieska) oraz z badań empirycznych (linia czerwona).

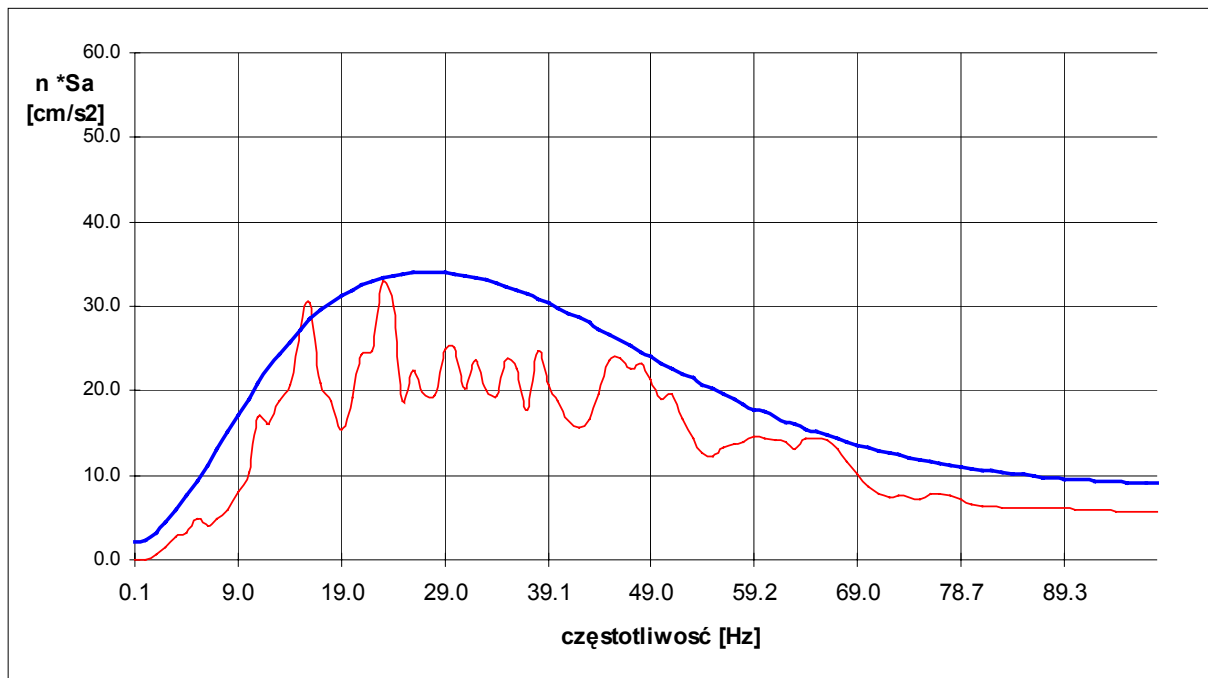


**Rys.5.3.18** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi samochodu ciężarowego w przekroju C po pasie 1 z prędkością 57.8 km/h otrzymane z SSN #7 (linia niebieska) oraz z badań empirycznych (linia czerwona).

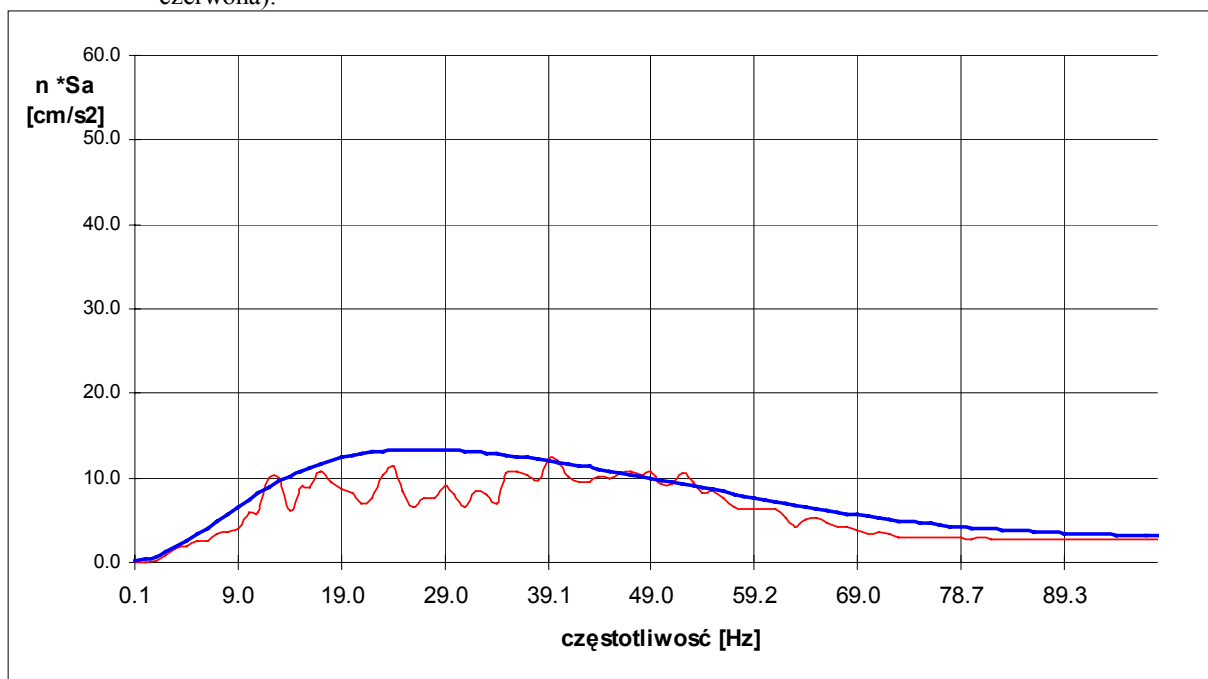


**Rys.5.3.19** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające przejazdowi samochodu ciężarowego z przyczepą (naczepą) w przekroju C po pasie 1 z prędkością 49.7 km/h otrzymane z SSN #7 (linia niebieska) oraz z badań empirycznych (linia czerwona).





**Rys.5.3.20** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające jednoczesnemu przejazdowi dwóch autobusów przegubowych w przekroju B: po pasie 1 z prędkością 49.9 km/h, oraz po pasie 2 z prędkością 36.0 km/h otrzymane z SSN #7 (linia niebieska) oraz z badań empirycznych (linia czerwona).



**Rys. 5.3.21** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi odpowiadające jednoczesnemu przejazdowi dwóch autobusów w przekroju B: po pasie 1 z prędkością 20.4 km/h, oraz po pasie 2 z prędkością 31.6 km/h otrzymane z SSN #7 (linia niebieska) oraz z badań empirycznych (linia czerwona).

Uzyskane za pomocą SSN #7 względne przyspieszeniowe spektra odpowiedzi opisane w tabelicy 5.3.4 przedstawiono na rys. 5.3.17 – 5.3.21. Porównano je z wykresami uzyskanymi na podstawie obliczeń z uwzględnieniem wyników badań doświadczalnych. Stwierdzono wystarczającą zgodność opisu, umożliwiającą wykorzystanie wyników SSN #7 w symulowaniu najniekorzystniejszych wartości rzędnych spektrum odpowiedzi. Tak więc problem budowania modelu za pomocą SSN uznano za rozwiązany z dokładnością wystarczającą w zastosowaniach praktycznych. W dalszej części taki model wykorzystano do analizowania wpływu wybranych parametrów ruchowo-drogowych na spektrum odpowiedzi drgań drogowych.

## 6 Analiza wpływu parametrów ruchowo-drogowych na spektrum odpowiedzi drgań drogowych

### 6.1 Wykorzystanie w analizie SSN uczonej na danych doświadczalnych

W poprzednim rozdziale opisano kolejne etapy budowania – z wykorzystaniem SSN – modelu umożliwiającego wyznaczenie spektrum odpowiedzi drgań drogowych przy założonych warunkach ruchowo-drogowych. W końcowej wersji w rozdz. 5 model taki tworzy sieć neuronowa oznaczona tam jako SSN #7. Tak zbudowany model może być wykorzystany w analizie wpływu parametrów ruchowo-drogowych na kształt i wartości przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych. Poniżej przedstawiono wyniki przeprowadzonych analiz. Podano je w trzech grupach analizując wpływ parametrów związanych z:

- ◆ źródłem drgań czyli pojazdami kołowymi poruszającymi się po drogach,
- ◆ propagacją drgań w otoczeniu drogi kołowej,
- ◆ usytuowaniem odbiornika drgań, względem drogi kołowej i rolą samego odbiornika drgań.

### 6.2 Wpływ parametrów związanych ze źródłem drgań na przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi

Ważną częścią parametrów związanych ze źródłem działań dynamicznych są informacje o pojazdach kołowych poruszających się po drogach. Spośród różnych pojazdów brane tu są pod uwagę te, których przejazd może generować drgania o znacznej intensywności. Do tej grupy zalicza się wszystkie pojazdy ciężkie. Niektóre z nich jednak występują na drogach bardzo rzadko. W dalszych rozważaniach pominięto je gdyż przy kształtowaniu modelu nie dysponowano wynikami badań odnoszącymi się do tych pojazdów. W analizie uwzględniono najczęściej występujące pojazdy ciężkie zestawione w następujących grupach:

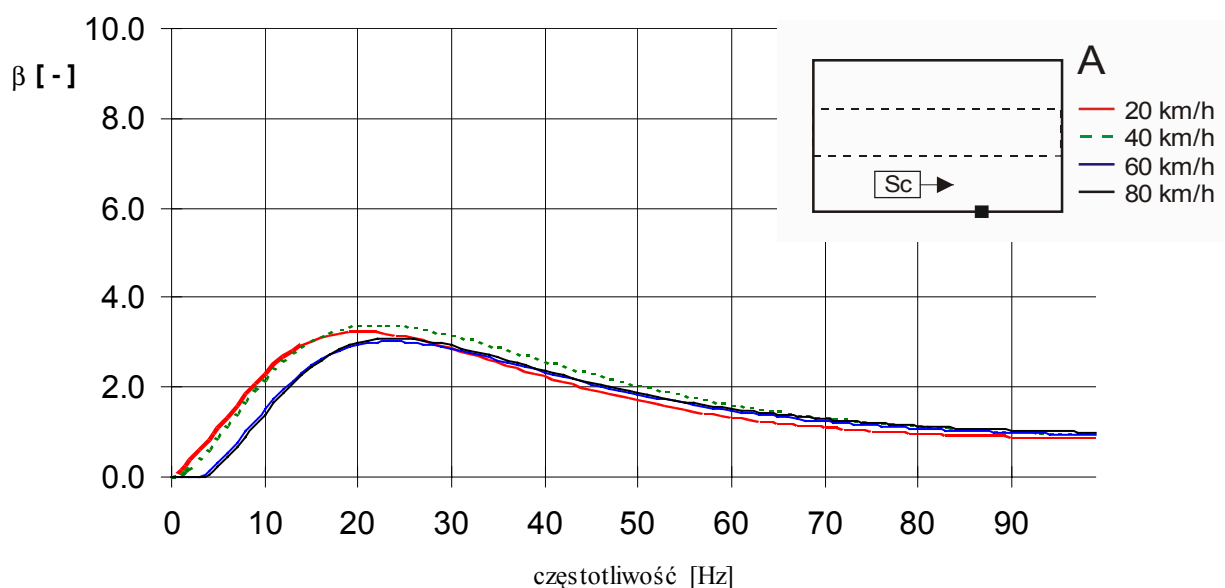
- ◆ samochody ciężarowe,
- ◆ samochody ciężarowe z przyczepami (naczepami),
- ◆ autobusy,
- ◆ autobusy przegubowe.

Spośród wielu parametrów charakteryzujących przejazdy wymienionych wyżej pojazdów wybrano (por. rozdz. 3) te, których wpływ uznano – na podstawie przeglądu literatury – za znaczący i których wartości można było jednoznacznie wyznaczyć podczas zbierania wyników badań doświadczalnych. Do tej grupy parametrów zaliczono przede wszystkim prędkość poruszania się pojazdów. Założono, że może ona należeć do czynników związanych ze źródłem drgań. Na interakcje pojazd-droga może mieć wpływ konstrukcja drogi oraz jej stan. Zakładając, iż przeprowadzone tu analizy będą dotyczyć dobrego stanu jezdni pozostaje do uwzględnienia w ocenie wpływu typ konstrukcyjnego rozwiązania drogi. W badaniach zbierano wyniki w przekrojach usytuowanych na drogach o trzech różnych typach rozwiązania konstrukcyjnego (przekroje A, B i C opisano w rozdz. 5). Nie było możliwe uwzględnienie pozostałych parametrów związanych ze źródłem drgań, które zestawiono w rozdz. 3.

Tak więc w tej części prezentacji wyników analiz badano zespół następujących czynników związanych ze źródłem drgań:

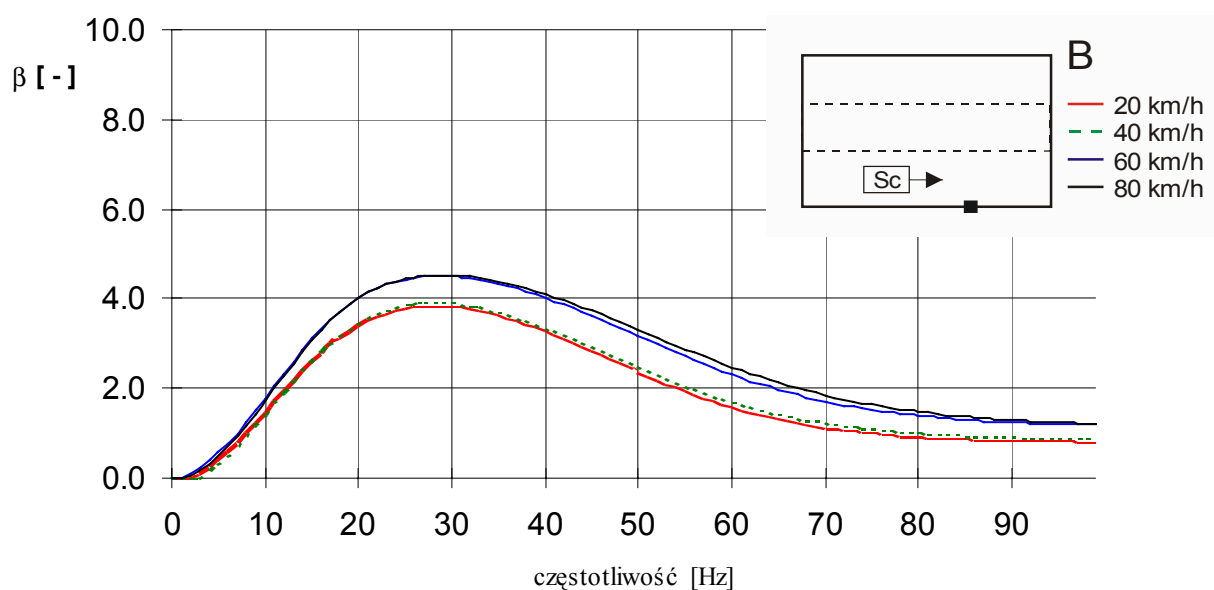
- typ pojazdu ciężkiego,
- układ pojazdów w różnych konfiguracjach ich przejazdu przez przekrój,
- rodzaj konstrukcji drogi,
- prędkość przejazdu.

Na kolejnych rysunkach zestawiono wybrane wyniki analiz. Najpierw przedstawiano względne przyspieszeniowe spektra odpowiedzi drgań drogowych chcąc w ten sposób sprawdzić, czy można wyróżnić wpływ czynników związanych ze źródłem drgań na zmiany spektrum odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości i w dziedzinie maksymalnych amplitud. Punkt pomiarowy usytuowany był w tych analizach na krawędzi jezdni. Trzy pierwsze rysunki obrazują zmiany  $\beta$  w zależności od typu drogi (przekroju) i prędkości jazdy samochodu ciężarowego. W przypadku przejazdu samochodu ciężarowego w przekroju A wraz ze wzrostem prędkości następuje nieznaczne przesunięcie w stronę wyższych częstotliwości dominujących rzędnych spektrów (rys. 6.2.1). W przekroju B, takie przejazdy nie zmieniają struktury częstotliwości a jedynie wzrost prędkości pojazdu prowadzi do wzrostu rzędnych (por. rys. 6.2.2).



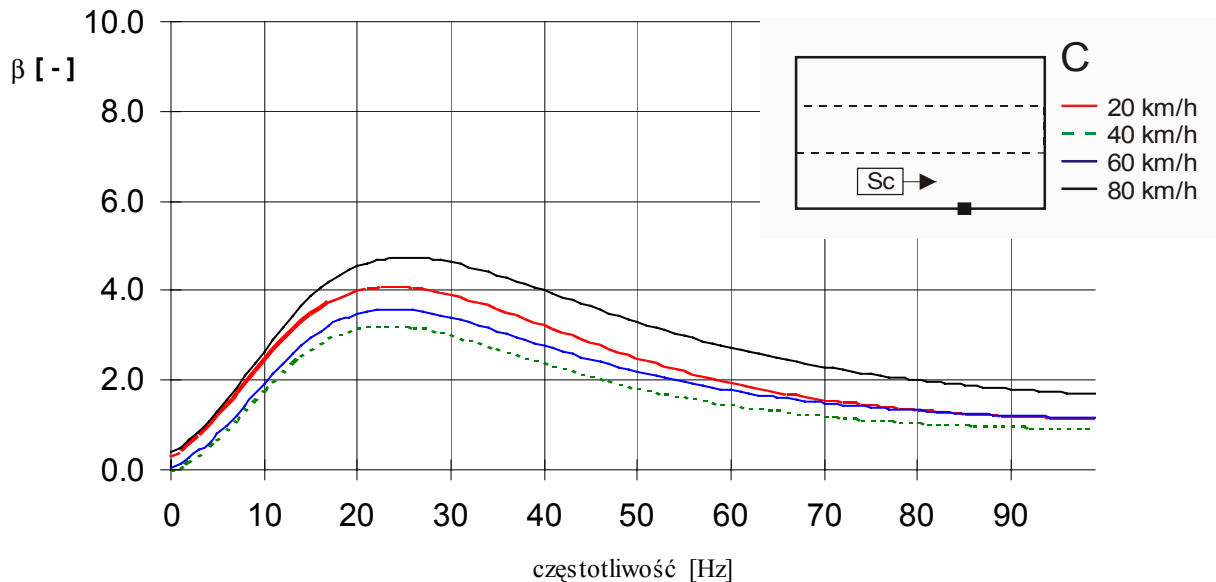
Rys.

6.2.1 Krzywe obrazujące względne spektra odpowiedzi przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 1, w przekroju A z prędkościami 20-80 km/h



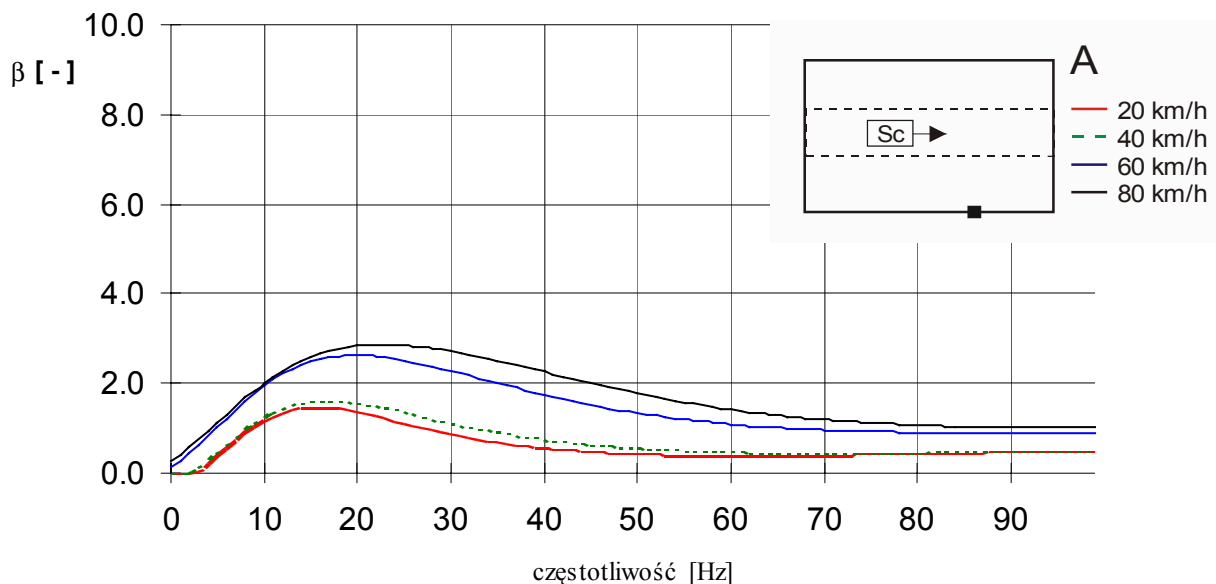
Rys.6.2.2 Krzywe obrazujące względne spektra odpowiedzi przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 1, w przekroju B z prędkościami 20-80 km/h.

W przekroju C, pokazanym na rys. 6.2.3, zmiana prędkości przejazdu samochodu ciężarowego wpływa na zmianę rzędnych względnego spektrum. Okazuje się jednak, że ta zmiana nie jest proporcjonalna do zmiany prędkości. Maksymalne rzędne krzywych spektralnych we wszystkich przypadkach przejazdu samochodu ciężarowego jadącego po pasie pierwszym, mieszczą się w przedziale od 3.0 do 5.0 przy zmianach prędkości przejazdu od 20 do 80 km/h.



**Rys.6.2.3** Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 1, w przekroju C z prędkościami 20-80 km/h.

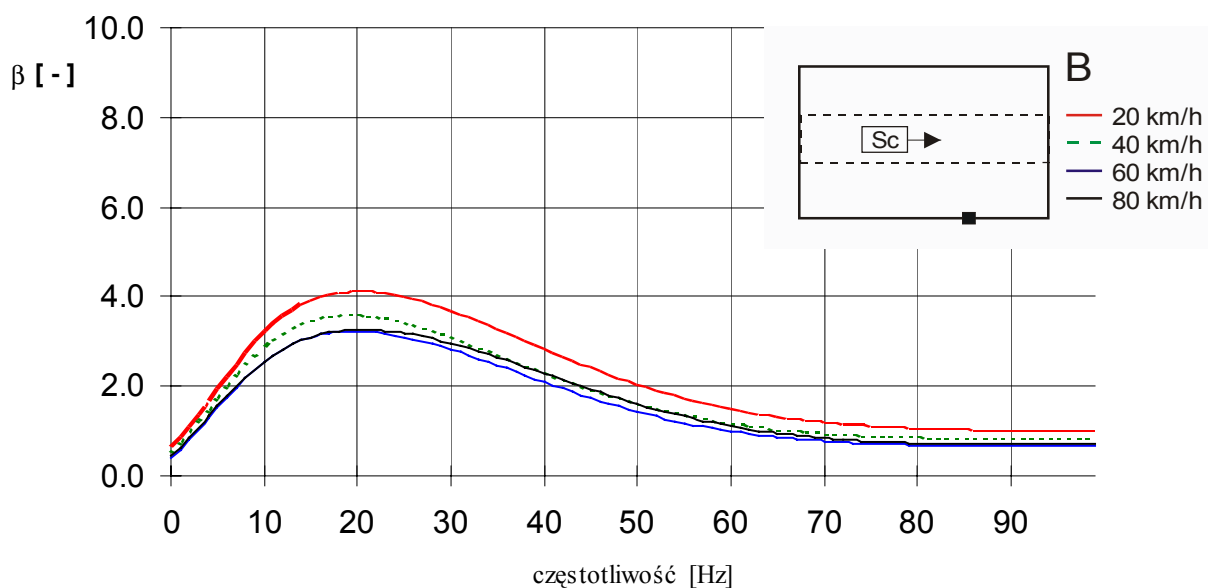
**Rys.6.2.4** Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie



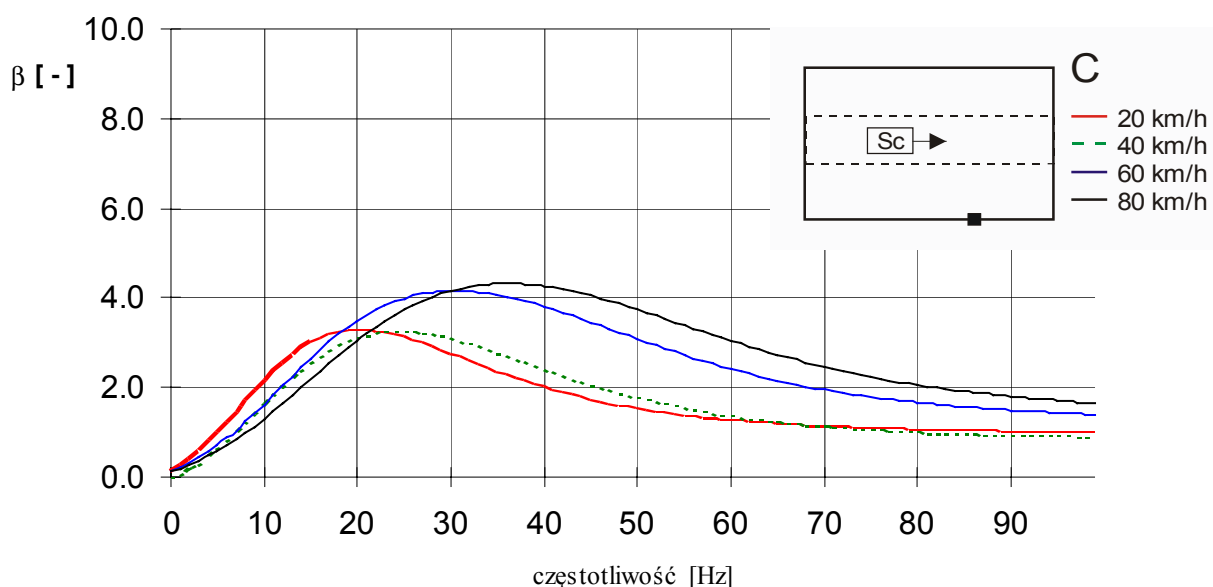
2, w przekroju A z prędkościami 20-80 km/h.

Kolejne rysunki (rys. 6.2.4 – 6.2.6) obrazują zmiany względnego spektrum odpowiedzi w sytuacji przejazdu samochodu ciężarowego drugim pasem jezdni. Na rys. 6.2.4 krzywe spektralne odnoszą się do przekroju A. Przejazdy pasem drugim powodują wzrost rzędnych względnego spektrum odpowiedzi wraz ze wzrostem prędkości pojazdów. Przesunięciu ulegają też przedziały występowania dominujących częstotliwości na wykresie spektralnym.

W przekroju B z kolei rzędne maksymalne linii spektralnych maleją wraz ze wzrostem prędkości przejazdu (por. rys. 6.2.5). W tych sytuacjach ruchowych przedział dominujących częstotliwości na wykresach spektralnych nie zmienia się. Warto porównać jeszcze wykresy podane np. na rys. 6.2.2 i 6.2.5 bowiem przejazd pasem drugim przesuwają przedział częstotliwości odpowiadających dominującym rzędnym względnego spektrum w kierunku niskich częstotliwości. Przejazd samochodu ciężarowego ze wzrastającymi prędkościami po pasie drugim w przekroju C (rys. 6.2.6) powoduje zwiększanie rzędnych spektrum odpowiedzi. W porównaniu z przejazdem tego typu pojazdu po pasie pierwszym w tym samym przekroju, widać wyraźnie przy przejeździe drugim pasem przesunięcie przedziału dominujących częstotliwości wraz ze wzrostem prędkości w kierunku wyższych częstotliwości i rozszerzenie tego przedziału (por. rys. 6.2.6).

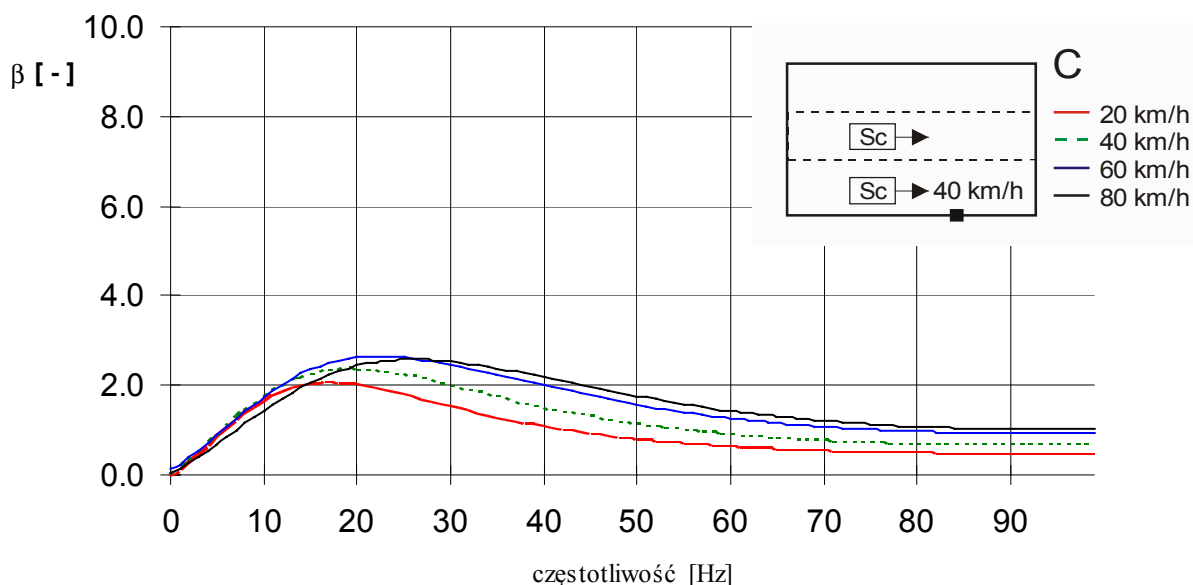


Rys.6.2.5 Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 2, w przekroju B z prędkościami 20-80 km/h.

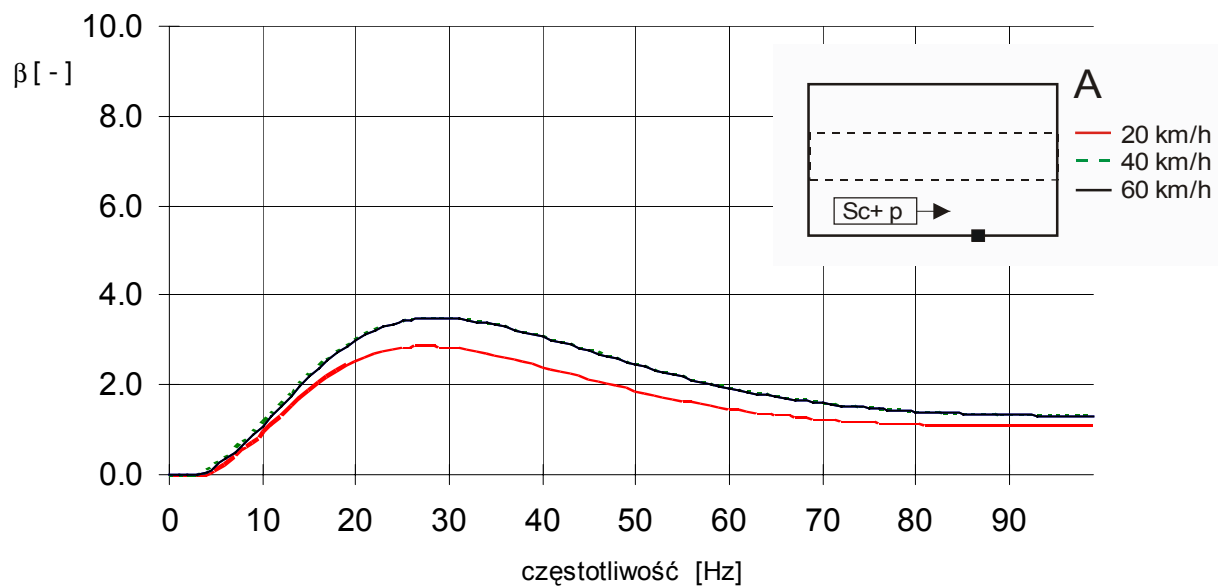


Rys.6.2.6 Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 2, z prędkościami 20-80 km/h, w przekroju C.

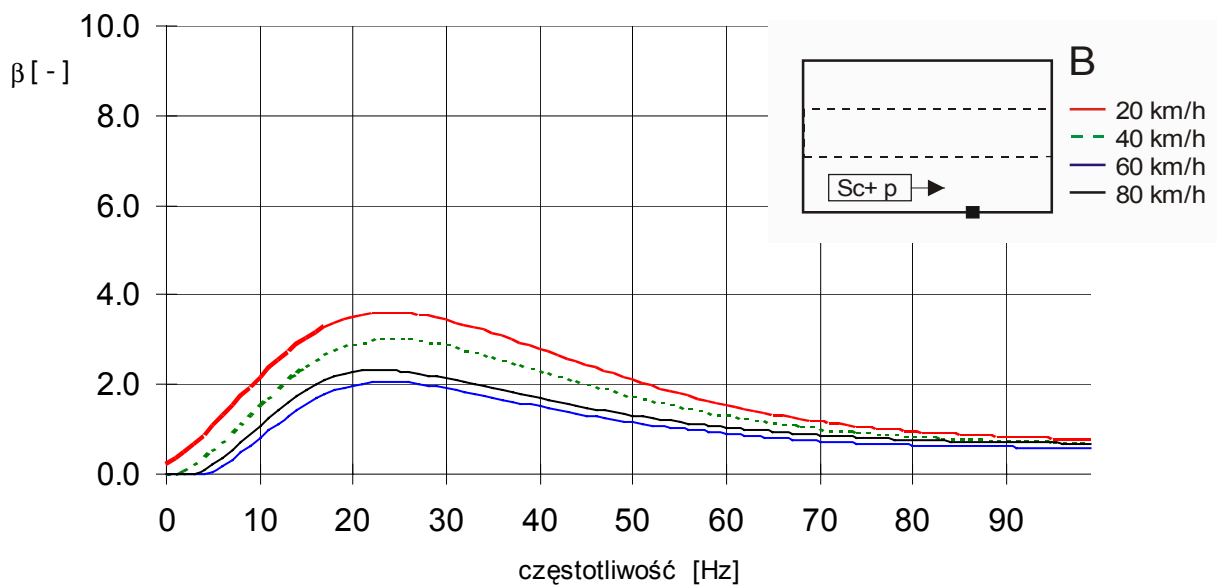
Stosowany tu model umożliwia również uzyskanie krzywych spektralnych przy przejazdach pojazdów w różnej ich konfiguracji. Przykładowe wykresy względnego, przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy jednoczesnym przejeździe oboma pasami dwóch samochodów ciężarowych w przekroju C pokazano na rys. 6.2.7. Prędkość pojazdu jadącego po pasie pierwszym była stała i wynosiła 40 km/h, podczas gdy zmieniano prędkość pojazdu poruszającego się po pasie drugim (od 20 do 80 km/h). Wraz ze zmianą prędkości przejazdu pojazdu na pasie drugim, zwiększeniu ulegają maksymalne wartości rzędnych spektralnych zaś przedział dominujących częstotliwości ulega rozszerzeniu. Z porównania wykresów spektralnych odpowiadających przejazdom pojedynczego pojazdu w tym przekroju z prędkością 40 km/h po pasie pierwszym oraz przejazdu po pasie drugim wynika, iż rezultatem przejazdu dwóch samochodów ciężarowych przedstawionych za pomocą względnego spektrum odpowiedzi nie jest wypadkowa lub średnia z krzywych uzyskanych przy przejazdach pojedynczych. Na kolejnych rysunkach podano względne przyspieszeniowe spektra odpowiedzi drgań drogowych generowanych przejazdem samochodu ciężarowego z przyczepą (naczepą) przez przekroje A (rys. 6.2.8) oraz C (rys. 6.2.10). Porównanie tych wykresów odpowiednio z podanymi na rys. 6.2.1, 6.2.2 i 6.2.3 pozwala na ocenienie wpływu typu ciężkiego pojazdu przejeżdżającego przez dany przekrój na kształt krzywych spektralnych. I tak np. przejazd samochodu ciężarowego przez przekrój B z różnymi prędkościami nie wpływa w znaczący sposób na kształt i rzędne linii względnego spektrum odpowiedzi (np. rys. 6.2.2) w przeciwieństwie do zjawiska obserwowanego podczas przejazdu przez ten sam przekrój samochodu ciężarowego z naczepą (rys. 6.2.9). Wręcz odwrotny jest wynik porównania wpływu przejazdu pojazdów tego typu przez przekrój C (rys. 6.2.3. oraz 6.2.10).



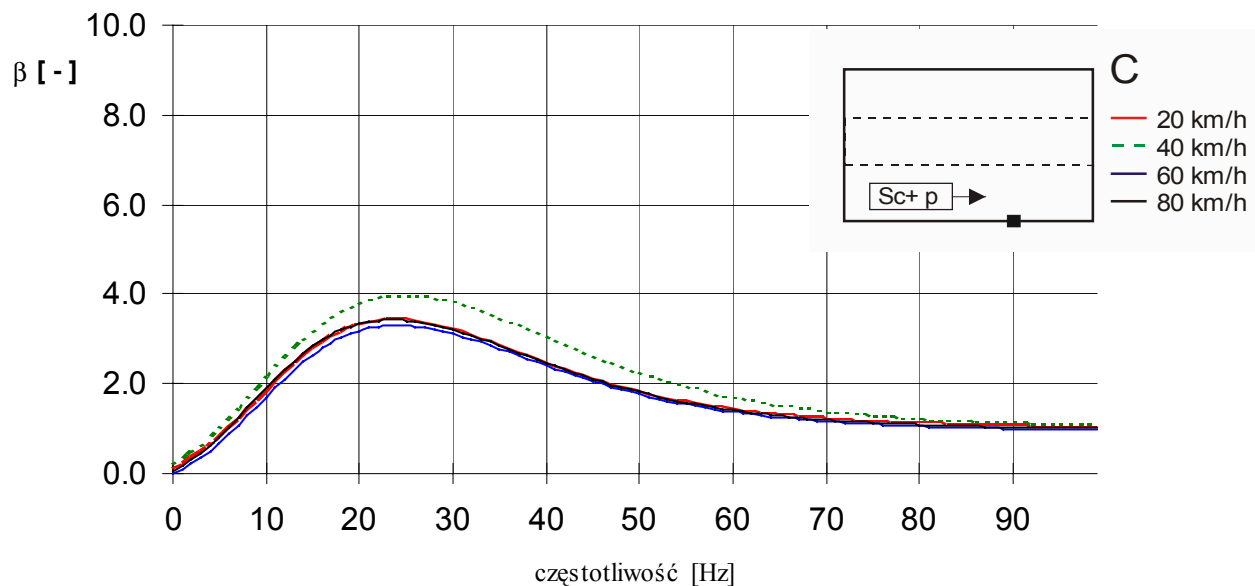
**Rys.6.2.7** Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe dwóch samochodów ciężarowych: po pasie 1 z prędkością 40 km/h oraz po pasie 2, z prędkościami 20-80 km/h, w przekroju C.



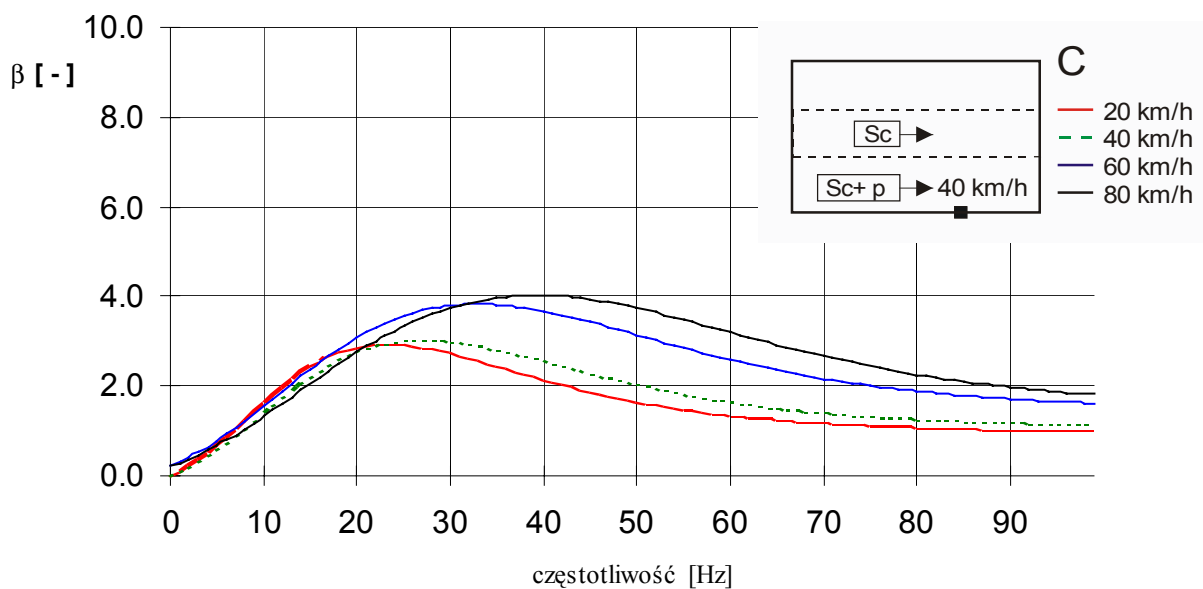
**Rys.6.2.8** Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe samochodu ciężarowego z przyczepą (naczepą) po pasie 1, z prędkościami 20-60 km/h, w przekroju A.



**Rys.6.2.9** Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe samochodu ciężarowego z przyczepą (naczepą) po pasie 1, z prędkościami 20-80 km/h, w przekroju B.



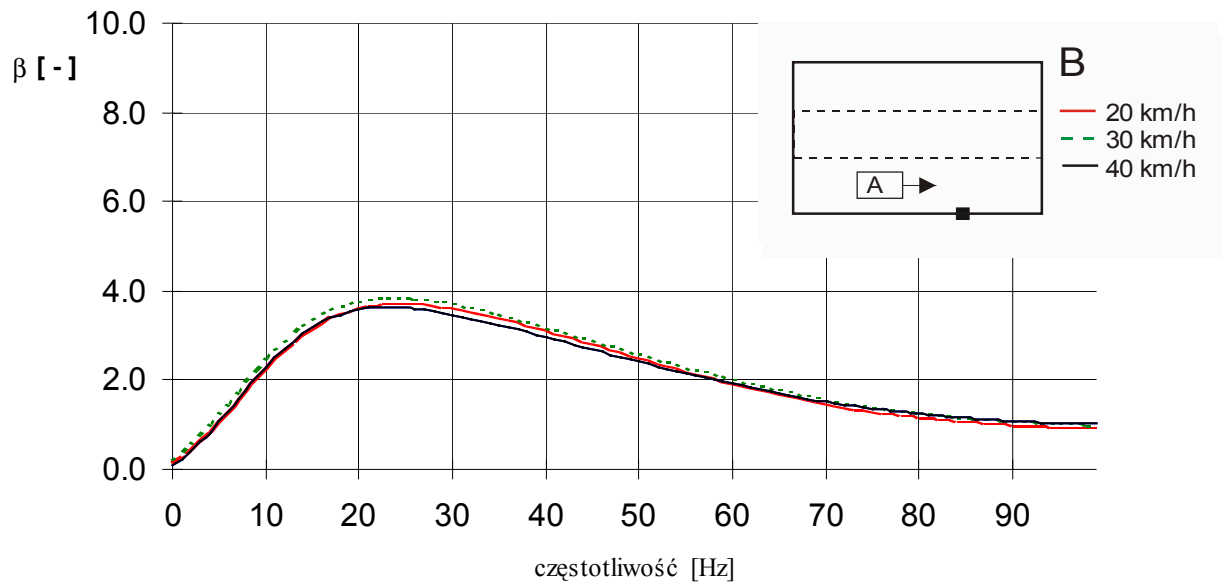
**Rys.6.2.10** Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe samochodu ciężarowego z przyczepą (naczepą) po pasie 1, z prędkościami 20-80 km/h, w przekroju C.



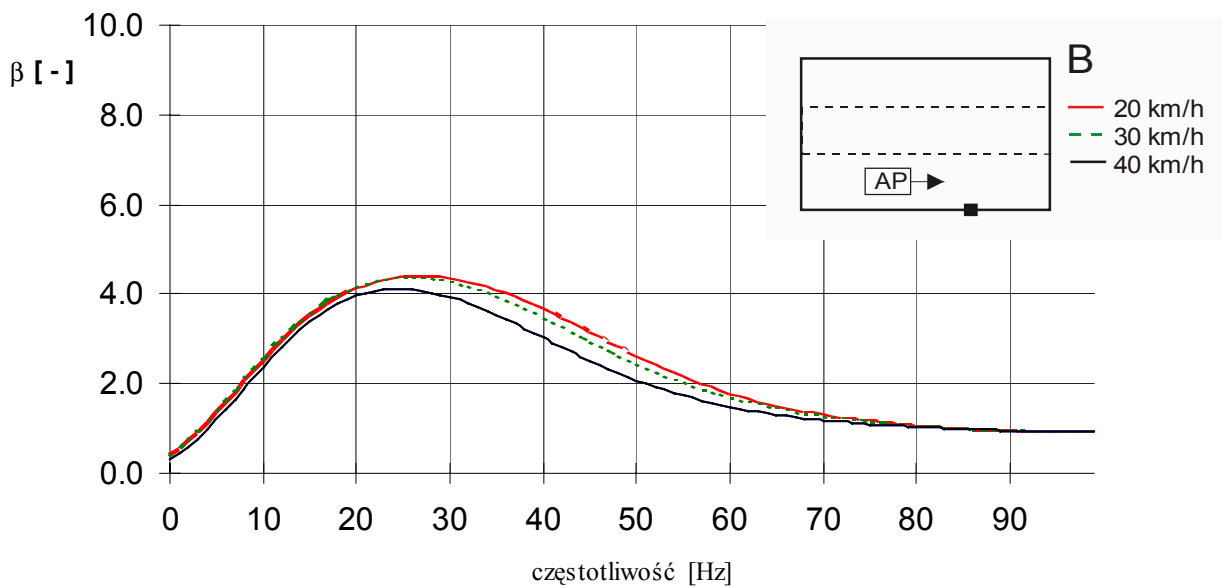
**Rys.6.2.11** Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe łączonym tzn.: po pasie pierwszym - samochodu ciężarowego z przyczepą z prędkością 40 km/h i jednocześnie po pasie drugim - samochodu ciężarowego ze zmienianą prędkością od 20 do 80 km/h. Wynik analizy dotyczy przekroju C. Można wykresy te porównać z rys. 6.2.7 zauważając podobny wpływ poruszania się pojazdów na kształt krzywych spektralnych.

Na rys. 6.2.11 zamieszczono wykresy względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe łączonym tzn.: po pasie pierwszym - samochodu ciężarowego z przyczepą z prędkością 40 km/h i jednocześnie po pasie drugim - samochodu ciężarowego ze zmienianą prędkością od 20 do 80 km/h. Wynik analizy dotyczy przekroju C. Można wykresy te porównać z rys. 6.2.7 zauważając podobny wpływ poruszania się pojazdów na kształt krzywych spektralnych.

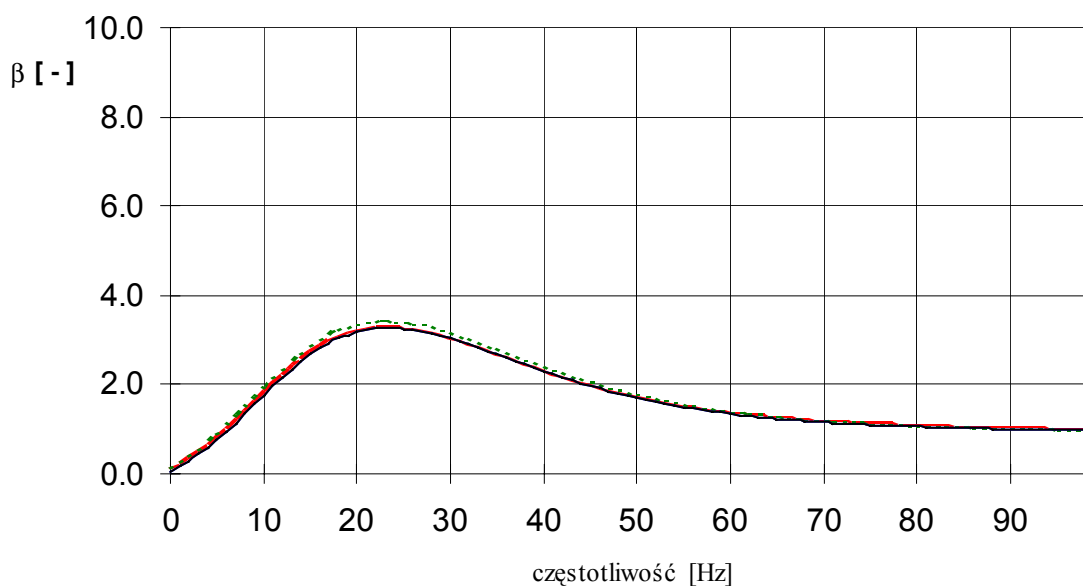




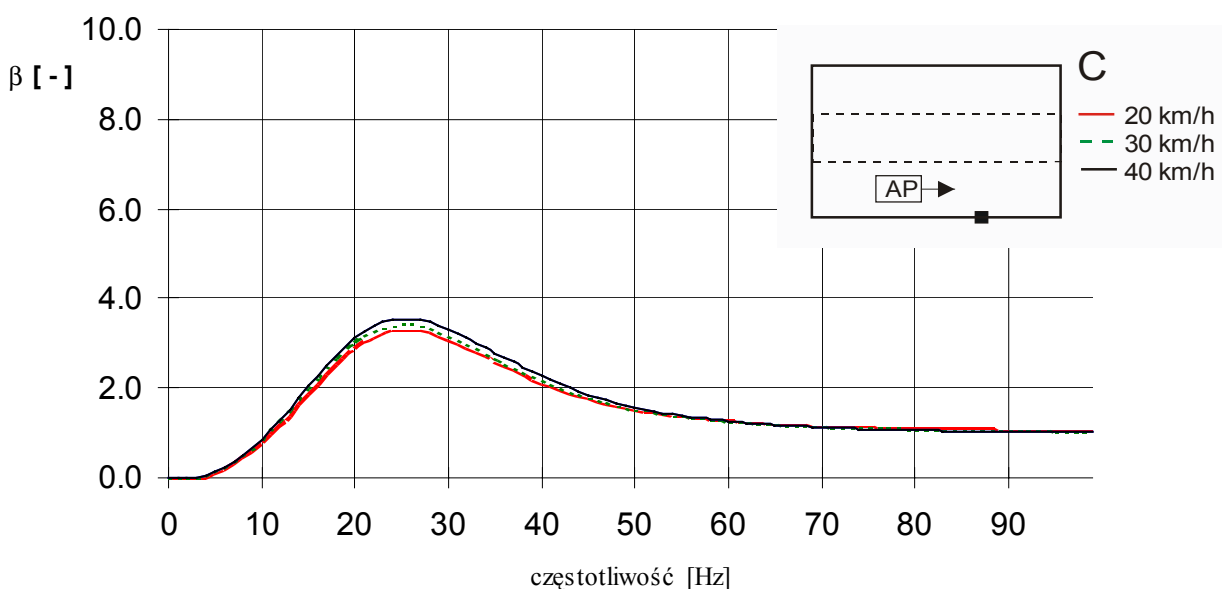
Rys.6.2.12 Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe autobusu po pasie 1, w przekroju B z prędkościami 20-40 km/h.



Rys.6.2.13 Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe autobusu przegubowego po pasie 1, w przekroju B z prędkościami 20-40 km/h

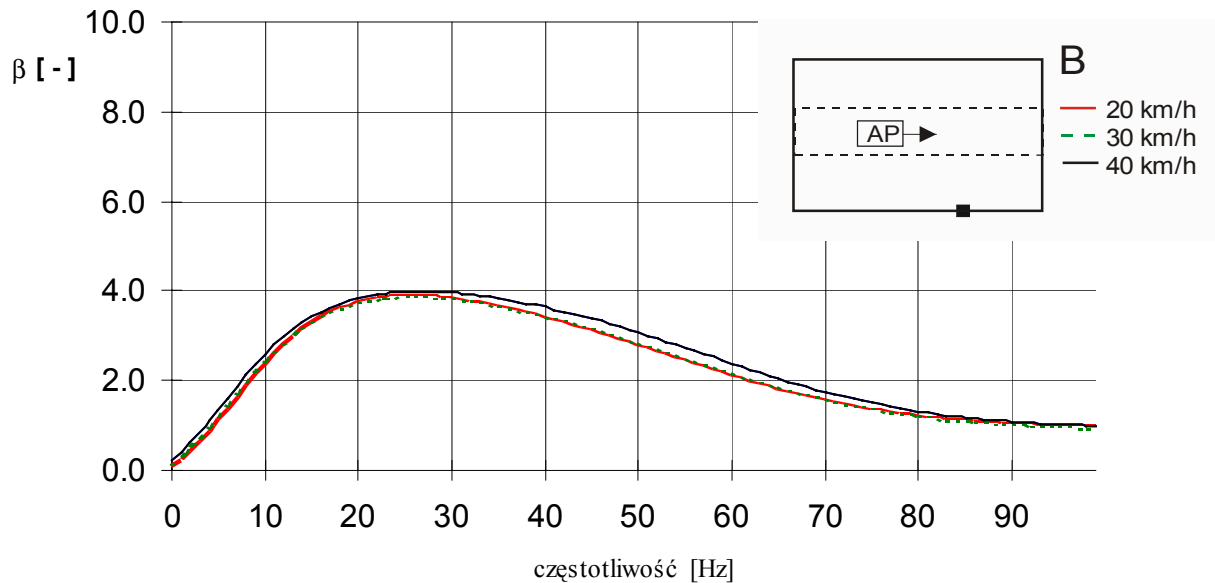


Rys.6.2.14 Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe autobusu po pasie 1, w przekroju C z prędkościami 20-40 km/h.

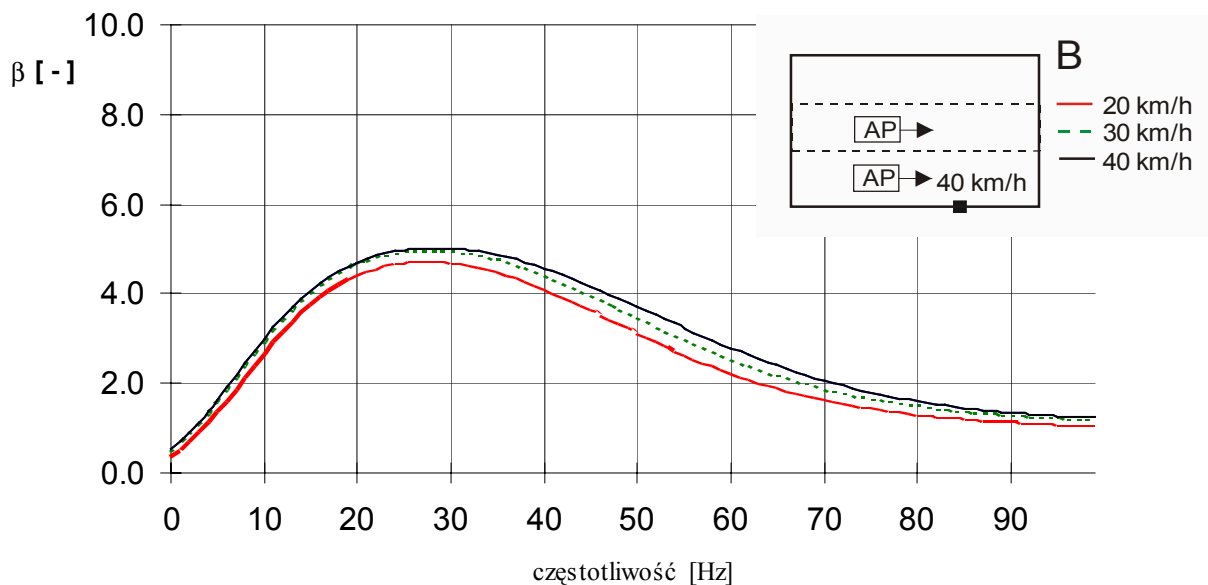


Rys.6.2.15 Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe autobusu przegubowego po pasie 1, w przekroju C z prędkościami 20-40 km/h.

Kolejne wykresy obrazują wpływ przejazdu przez przekroje B i C autobusów na kształt względnego spektrum odpowiedzi. Na rys. 6.2.12 zamieszczono krzywe spektralne uzyskane przy przejeździe po pasie pierwszym przez przekrój B autobusu z prędkościami 20, 30 i 40 km/h. Widoczne są niewielkie zmiany rzędnych i przedziału dominujących częstotliwości na wykresach odpowiadających poszczególnym przekrojom.



**Rys.6.2.16** Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe autobusu przegubowego po pasie 2, w przekroju B z prędkościami 20-40 km/h.



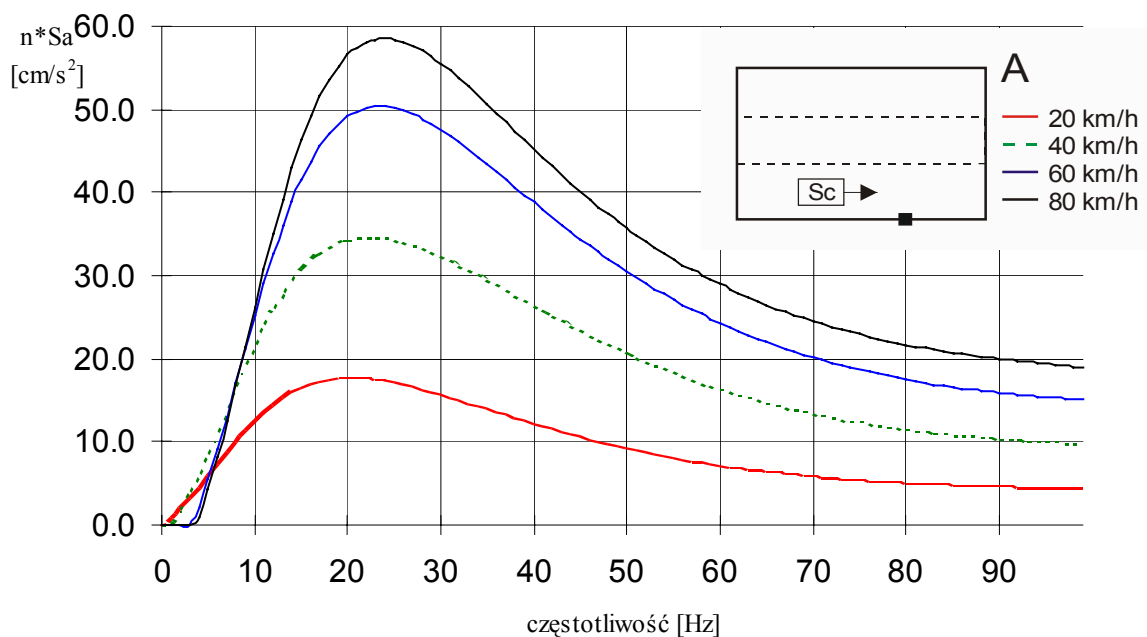
**Rys.6.2.17** Krzywe względnego spektrum odpowiedzi przy przejeździe dwóch autobusów przegubowych, pierwszego po pasie 1 z prędkością 40 km/h, zaś drugiego po pasie 2 z prędkościami 20-40 km/h, w przekroju B.

Podobne wykresy dotyczące przejazdów autobusów zestawiono na rys. 6.2.13 (dotyczy przejazdu autobusu przegubowego przez przekrój B) i rys. 6.2.14 (dotyczy przejazdu autobusu przez przekrój C). Wszystkie one pokazują, iż rodzaj autobusu (przegubowy i pojedynczy) oraz prędkości pojazdów nie wpływają znacząco na kształt linii względnego spektrum odpowiedzi. Istotnie natomiast na kształt tej linii wpływa rozwiązanie konstrukcyjne drogi (typ przekroju). Widać bowiem wyraźnie, że linie względnego spektrum odpowiedzi uzyskane w przekroju B charakteryzują się rozszerzonym pasmem częstotliwości, w którym występują dominujące rzędne spektrum w porównaniu z tymi liniami odpowiadającymi przekrojowi C (por. rys 6.2.12 i 6.2.14 oraz 6.2.13 i 6.2.15). Podobne spostrzeżenie odnośnie do wpływu przejazdu autobusu pasem 2 (rys. 6.2.16) oraz przejazdu autobusów w różnej konfiguracji (rys. 6.2.17) nasuwa się podczas oceny

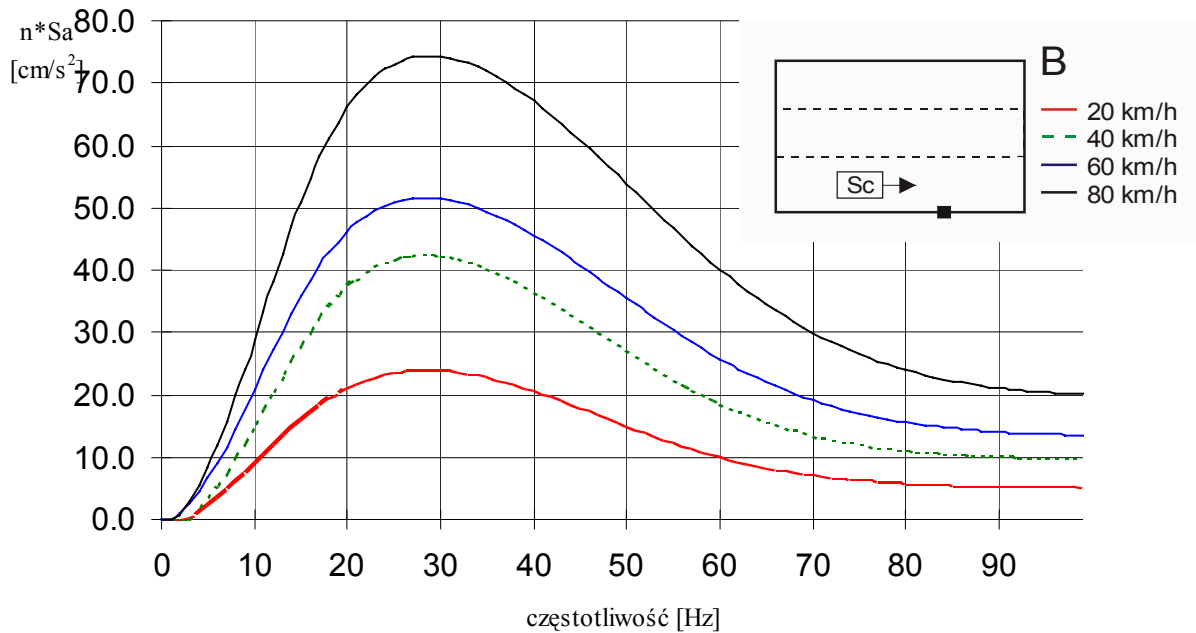
wykresów zawartych na następnych rysunkach. Zmiany prędkości autobusów i autobusów przegubowych w niewielkim stopniu wpływają na kształt względnego spektrum odpowiedzi.

Już wcześniej (por. rozdz. 5) zwrócono uwagę na to, iż w wyniku wielu przeprowadzonych analiz nie udało się rozdzielić parametrów ruchowo-drogowych na takie, które znacząco oddziałują na kształt względnego spektrum odpowiedzi drgań drogowych. Analiza krzywych obrazujących względne przyspieszeniowe spektra odpowiedzi była prowadzona właśnie pod takim kątem. Zamierzano bowiem sprawdzić, czy byłoby możliwe skonstruowanie modelowego kształtu jednej linii względnego spektrum odpowiedzi dotyczącej drgań drogowych. Wówczas wystarczyłoby tylko, za pomocą odpowiednio nauczonej SSN wyznaczyć wartości maksymalnych przyspieszeń odpowiadające założonym warunkom ruchowo-drogowym. Przedstawione powyżej przykładowe wyniki wybrane z wielu wyników analiz pokazują wyraźnie, że parametry ruchowo-drogowe mogą mieć wpływ na kształt linii względnego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych. I to wpływ ten może być różny. Zdecydowano się więc w dalszych analizach uwzględniać w ocenie linie odpowiadające przyspieszeniowym spektrum odpowiedzi (rzędne w  $\text{cm/s}^2$ ) i to wyznaczonym z uwzględnieniem współczynnika powiększenia „n” a więc ujmującym linie ograniczające od góry krzywe spektralne uzyskane z wyników pomiarów. W celu ułatwienia dalszych analiz i odnoszenia ich do wcześniej rozpatrywanych, porównywalnych sytuacji przejazdu pojazdów przez analizowane przekroje w tabelicy 6.2.1 zestawiono najważniejsze informacje o sytuacjach ruchowo-drogowych, odpowiadających wykresom podanym na rysunkach. Zestawiono tam również wyniki obliczenia wartości  $A_{\text{max}}$  oraz  $n$  odpowiadających krzywom  $S_a$  oraz  $\beta$ . W podobny sposób przedstawiono pozostałe wyniki analiz oraz odpowiadające im rysunki. Kolejne rysunki zatem odnoszące się do warunków już opisywanych wcześniej oznaczone są tym samym numerem i literą „a”. W kolejnych tablicach 6.2.2, 6.2.3 i 6.2.4 zestawiono podobne informacje odnoszące się do następnych wykresów.

Pokazane dotychczas wykresy spektrów względnych miały na celu zwrócenie uwagi na charakterystykę częstotliwościową przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi drgań drogowych. Wykresy zaś w tej części zamieszczone a dotyczące przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi pokazują wartości bezwzględne tych spektrów.



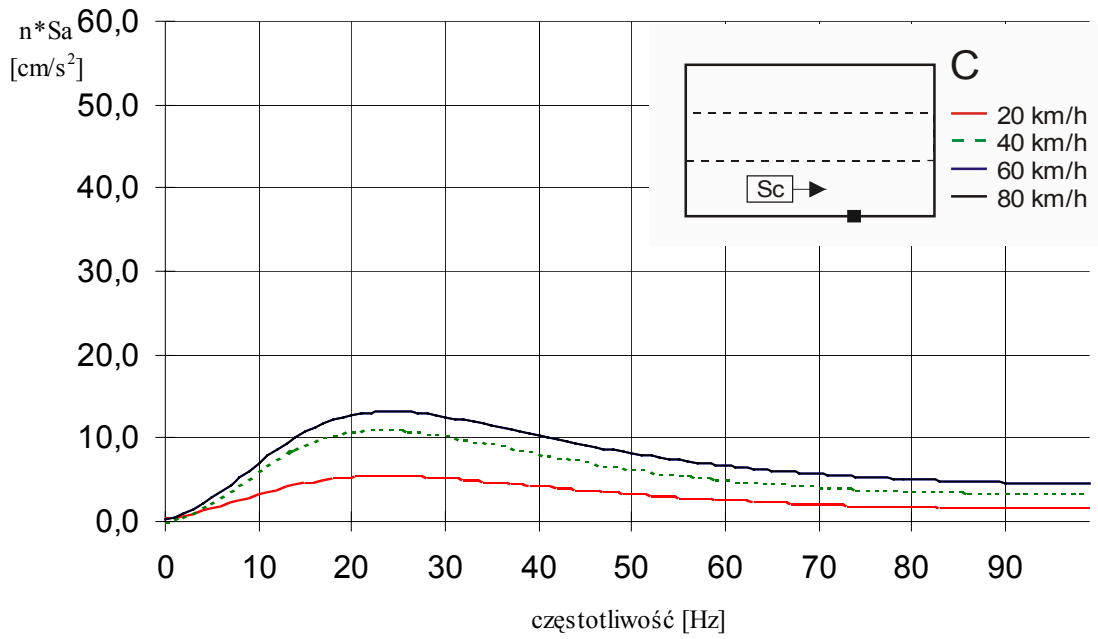
Rys. 6.2.1a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.1.



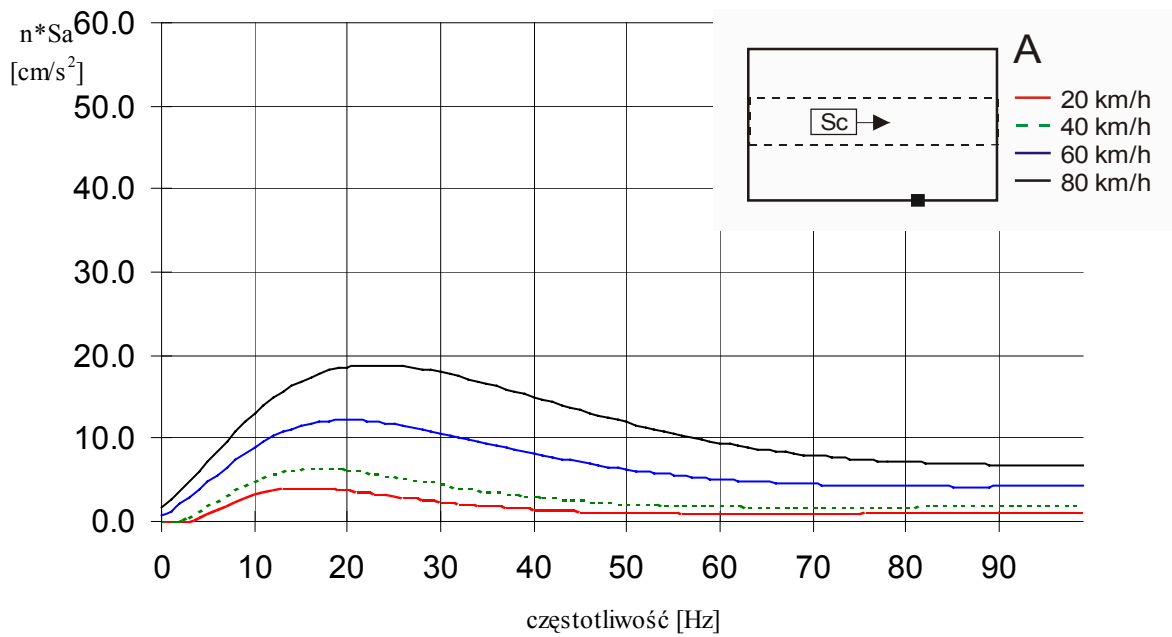
Rys. 6.2.2a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.2.

Tablica 6.2.1 Charakterystyka przejazdów pojedynczych samochodów ciężarowych przez badane przekroje odpowiadająca warunkom rozpatrywanym wcześniej na rys. 6.2.1-6.2.6.

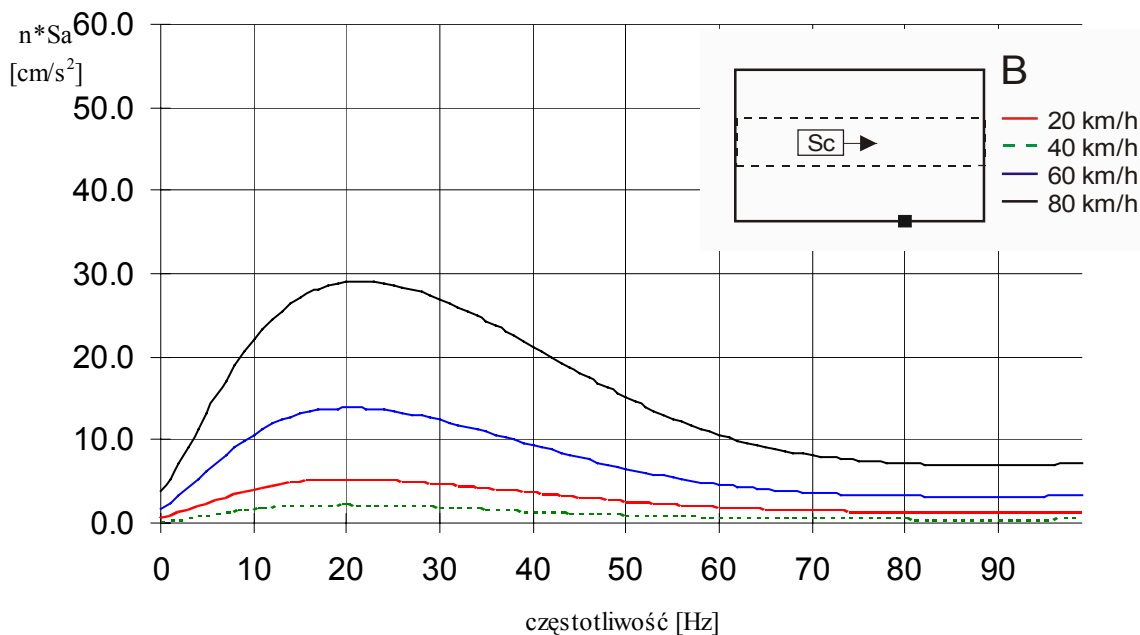
Nr	Typ i prędkość pojazdu poruszającego się po pasie:		Badany przekrój	A <sub>max</sub> [cm/s <sup>2</sup> ]	n [-]	Wykresy zamieszczono na rysunkach:
	pierwszym [km/h]	drugim [km/h]				
1	Sc - 20	-	A	2.24	2.38	Por. rys. 6.2.1 oraz rys. 6.2.1a
2	Sc - 40	-		6.17	1.64	
3	Sc - 60	-		10.74	1.54	
4	Sc - 80	-		13.17	1.44	
5	Sc - 20	-	B	4.18	1.51	Por. rys. 6.2.2 oraz rys. 6.2.2a
6	Sc - 40	-		6.75	1.62	
7	Sc - 60	-		6.86	1.66	
8	Sc - 80	-		8.22	1.99	
9	Sc - 20	-	C	1.25	1.09	Por. rys. 6.2.3 oraz rys. 6.2.3a
10	Sc - 40	-		3.44	1.00	
11	Sc - 60	-		3.67	1.02	
12	-	Sc - 20	A	1.83	1.45	Por. rys. 6.2.4 oraz rys. 6.2.4a
13	-	Sc - 40		2.74	1.43	
14	-	Sc - 60		2.75	1.69	
15	-	Sc - 80		3.94	1.68	
16	-	Sc - 20	B	0.67	1.98	Por. rys. 6.2.5 oraz rys. 6.2.5a
17	-	Sc - 40		0.97	1.00	
18	-	Sc - 60		2.42	1.87	
19	-	Sc - 80		4.66	2.01	
20	-	Sc - 20	C	0.64	2.18	Por. rys. 6.2.6 oraz rys. 6.2.6a
21	-	Sc - 40		2.06	1.22	
22	-	Sc - 60		1.52	2.06	
23	-	Sc - 80		1.47	2.08	



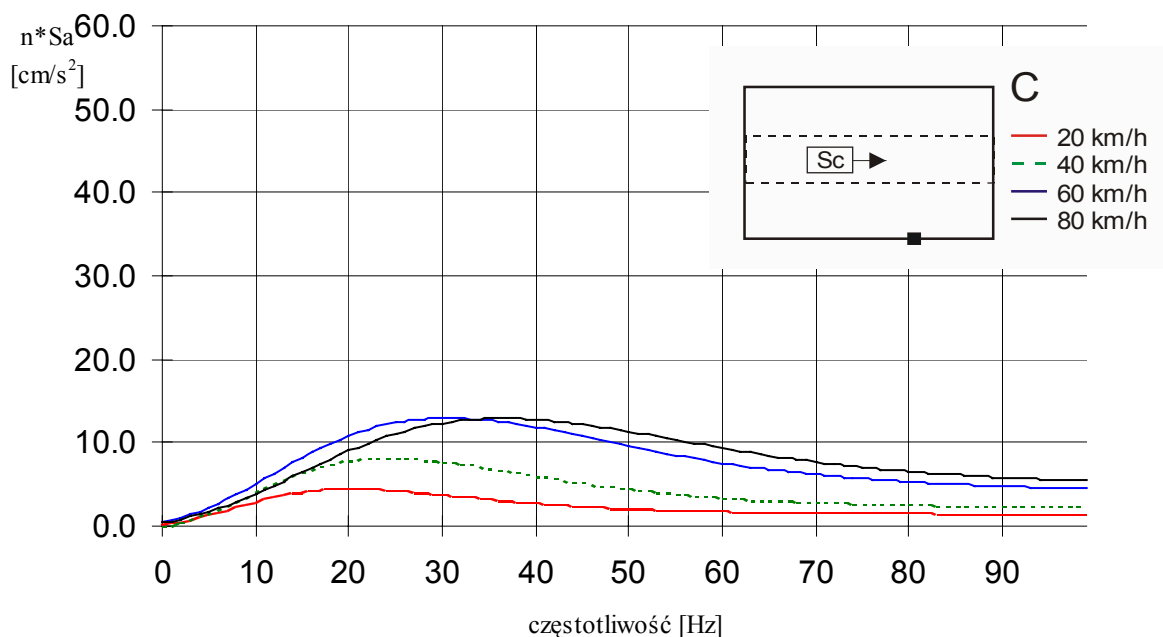
Rys. 6.2.3a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.3.



Rys. 6.2.4a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.4.



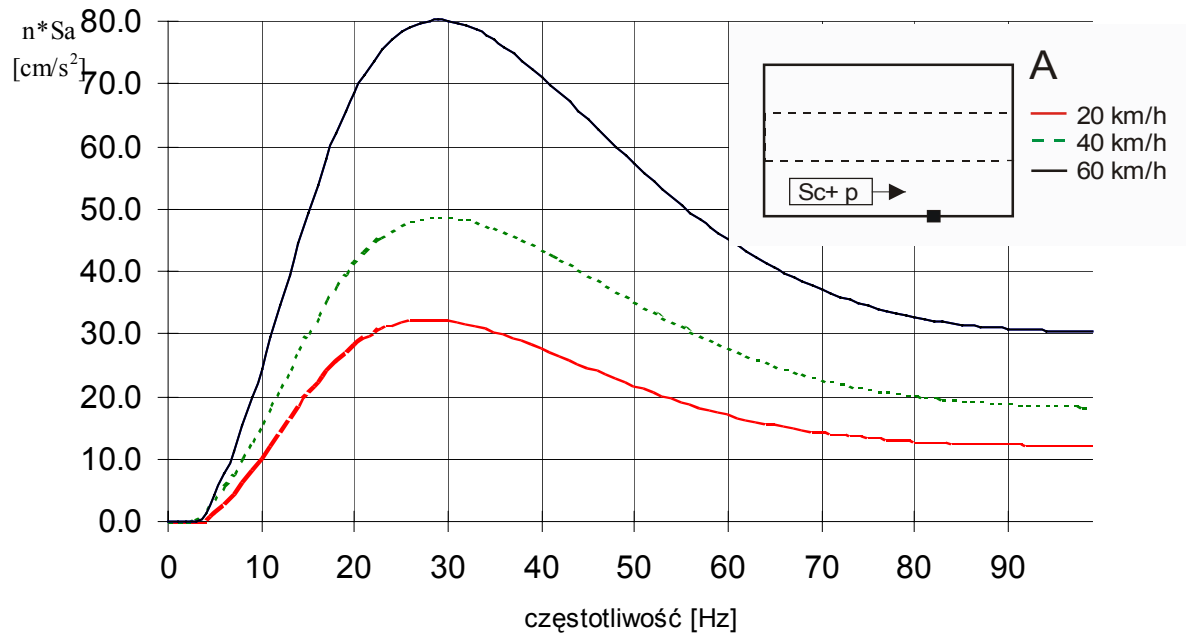
Rys. 6.2.5a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.5.



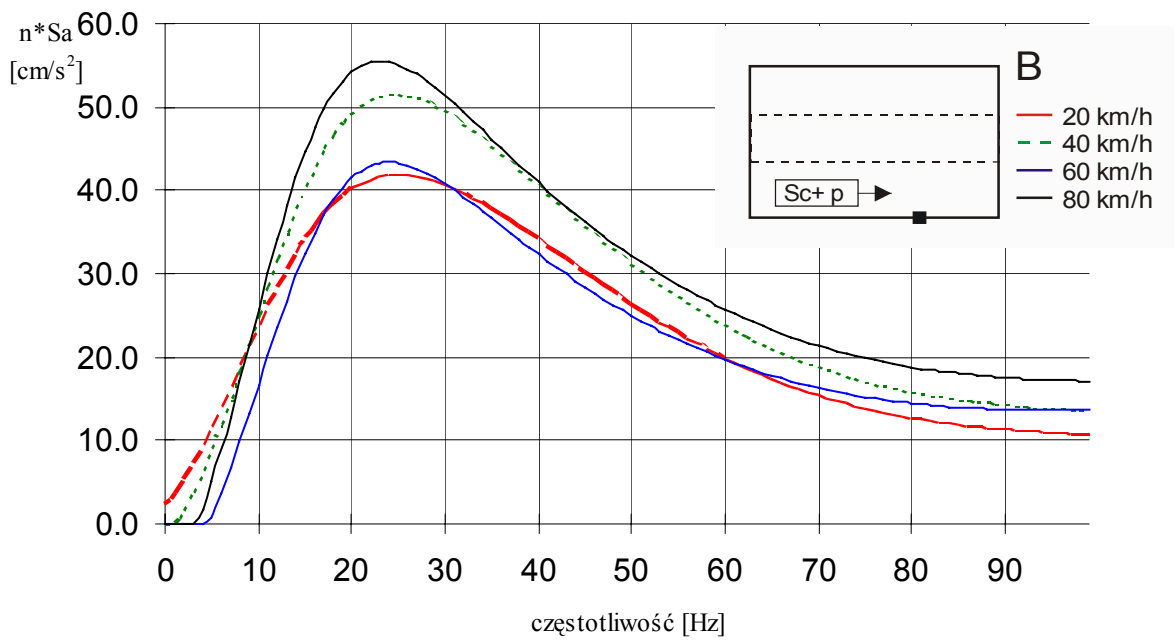
Rys. 6.2.6a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.6.

Tablica 6.2.2 Charakterystyka przejazdów pojedynczych samochodów ciężarowych z przyczepami (naczepami) przez badane przekroje odpowiadająca warunkom rozpatrywanym wcześniej na rys. 6.2.8-6.2.9.

Nr	Typ i prędkość pojazdu poruszającego się po pasie:		Badany przekrój	$A_{max}$ [cm/s <sup>2</sup> ]	n [-]	Wykresy zamieszczono na rysunkach:
	pierwszym [km/h]	drugim [km/h]				
1	Sc+p - 20	-	A	3.81	2.34	Por. rys. 6.2.8 oraz 6.2.8a
2	Sc+p - 40	-		6.68	1.60	
3	Sc+p - 60	-		9.29	2.17	
4	Sc+p - 20	-	B	5.11	2.41	Por. rys. 6.2.9 oraz 6.2.9a
5	Sc+p - 40	-		9.11	1.95	
6	Sc+p - 60	-		11.30	1.92	
7	Sc+p - 80	-		11.74	2.08	



Rys. 6.2.8a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.8.

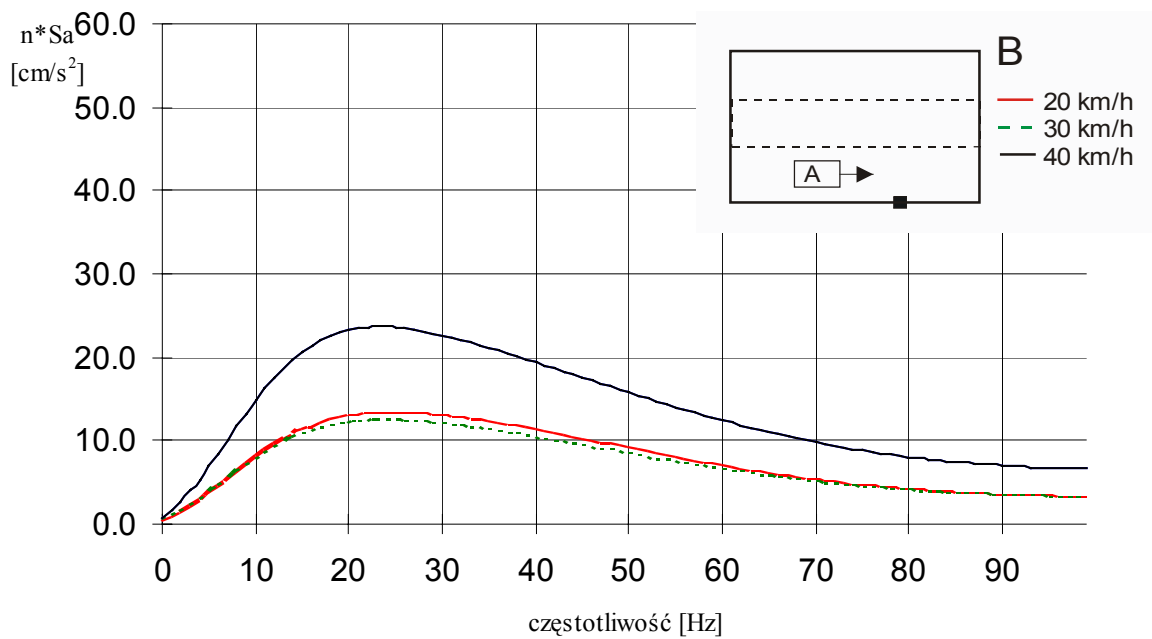


Rys. 6.2.9a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.9.

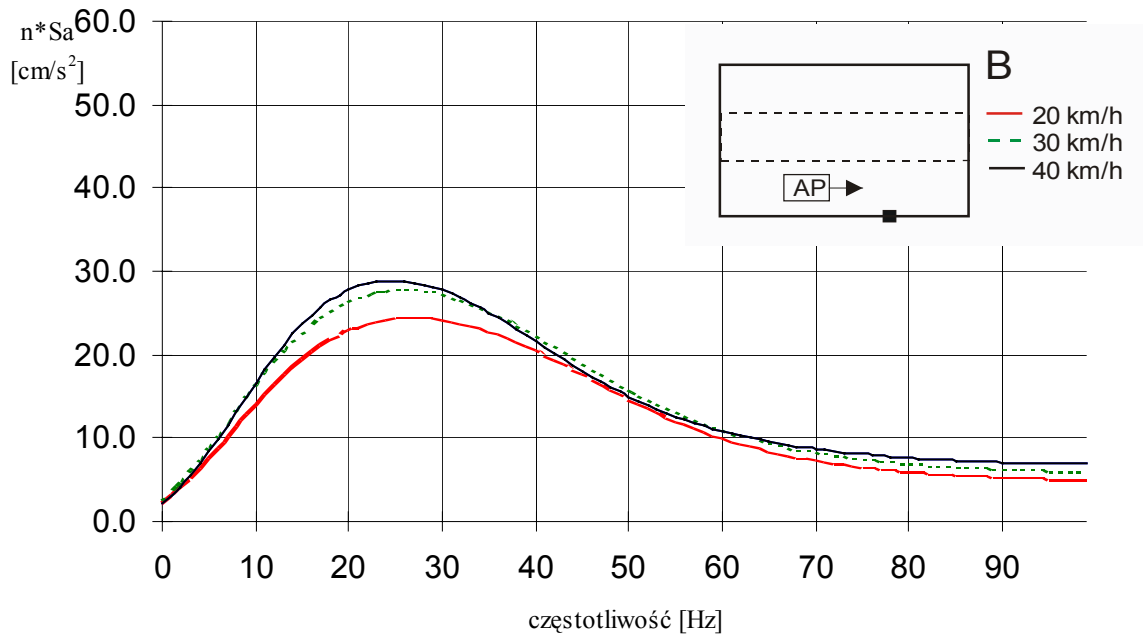


**Tablica 6.2.3** Charakterystyka przejazdów pojedynczych autobusów i autobusów przegubowych przez badane przekroje odpowiadająca warunkom rozpatrywanym wcześniej na rys. 6.2.12-6.2.16.

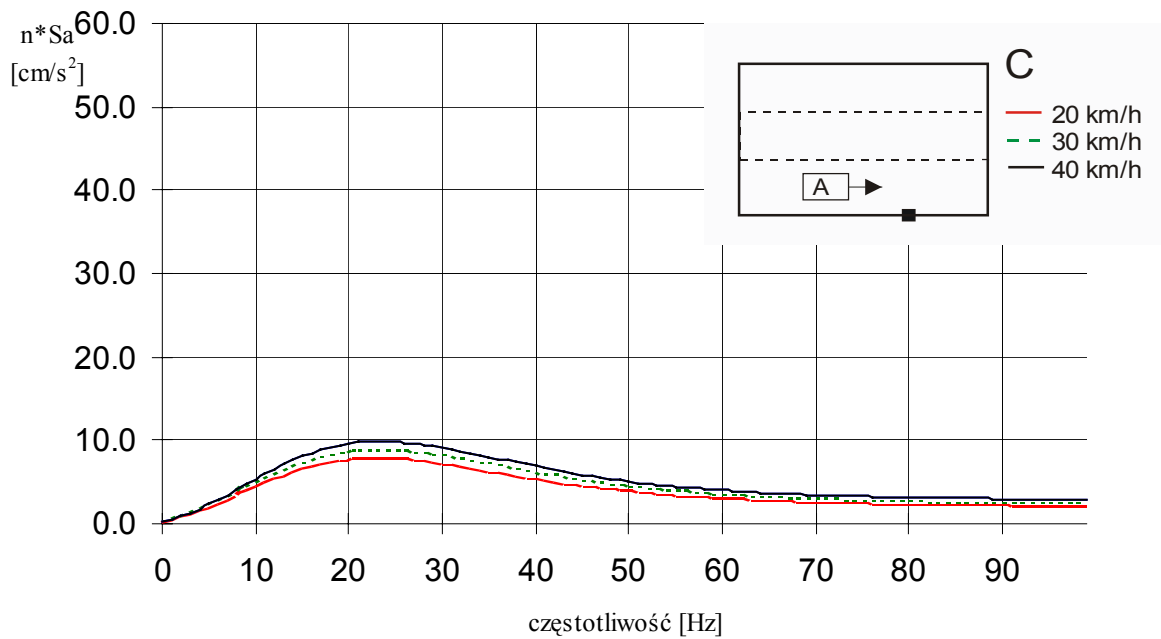
Nr	Typ i prędkość pojazdu poruszającego się po pasie:		Badany przekrój	$A_{max}$ [cm/s <sup>2</sup> ]	n [-]	Wykresy zamieszczono na rysunkach:
	pierwszym [km/h]	drugim [km/h]				
1	A - 20	-	B	2.95	1.24	Por. rys. 6.2.12 oraz rys.6.2.12a
2	A - 30	-		3.37	1.00	
3	A - 40	-		4.35	1.50	
4	AP - 20	-	B	3.30	1.68	Por. rys. 6.2.13 oraz rys.6.2.13a
5	AP - 30	-		3.63	1.77	
6	AP - 40	-		4.24	1.70	
7	A - 20	-	C	1.49	1.54	Por. rys. 6.2.14 oraz rys.6.2.14a
8	A - 30	-		2.21	1.17	
9	A - 40	-		2.46	1.21	
10	AP - 20	-	C	2.32	1.00	Por. rys. 6.2.15 oraz rys.6.2.15a
11	AP - 30	-		2.75	1.65	
12	AP - 40	-		2.86	2.41	
13	-	AP - 20	B	0.79	1.00	Por. rys. 6.2.16 oraz rys.6.2.16a
14	-	AP - 30		1.56	1.00	
15	-	AP - 40		2.34	1.72	



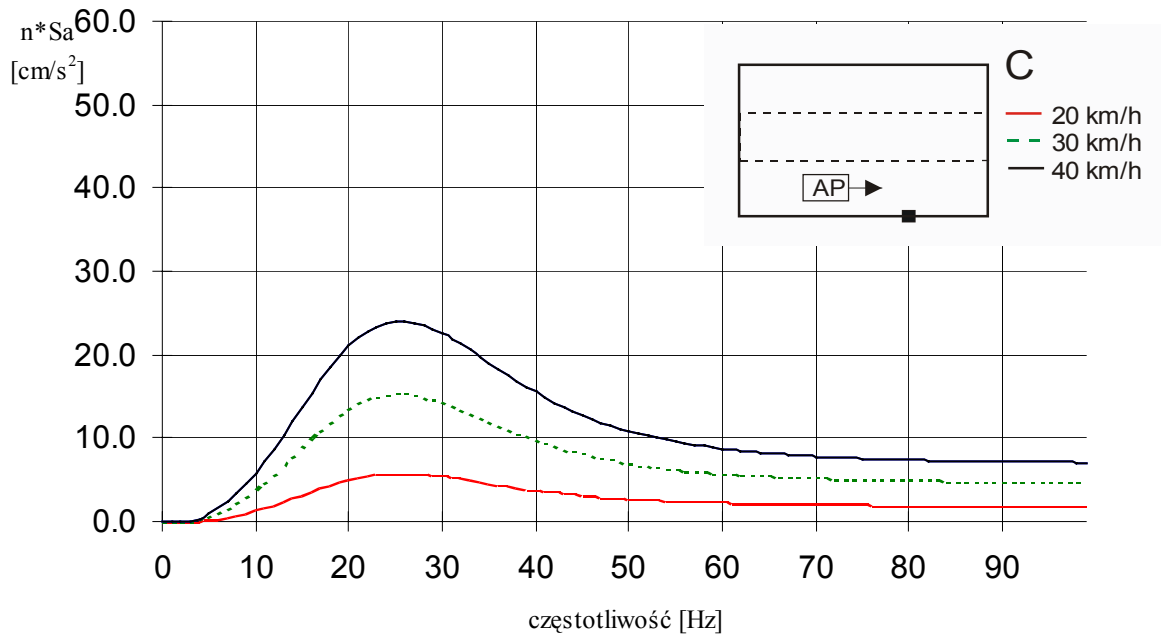
**Rys. 6.2.12a** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.12.



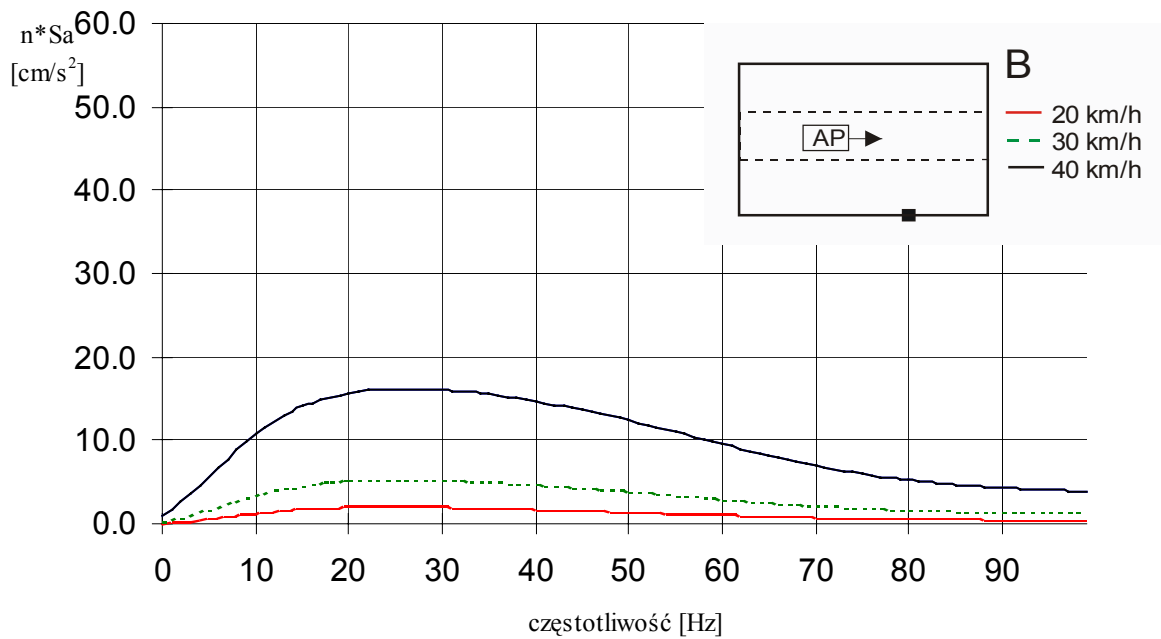
Rys. 6.2.13a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.13.



Rys. 6.2.14a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.14.



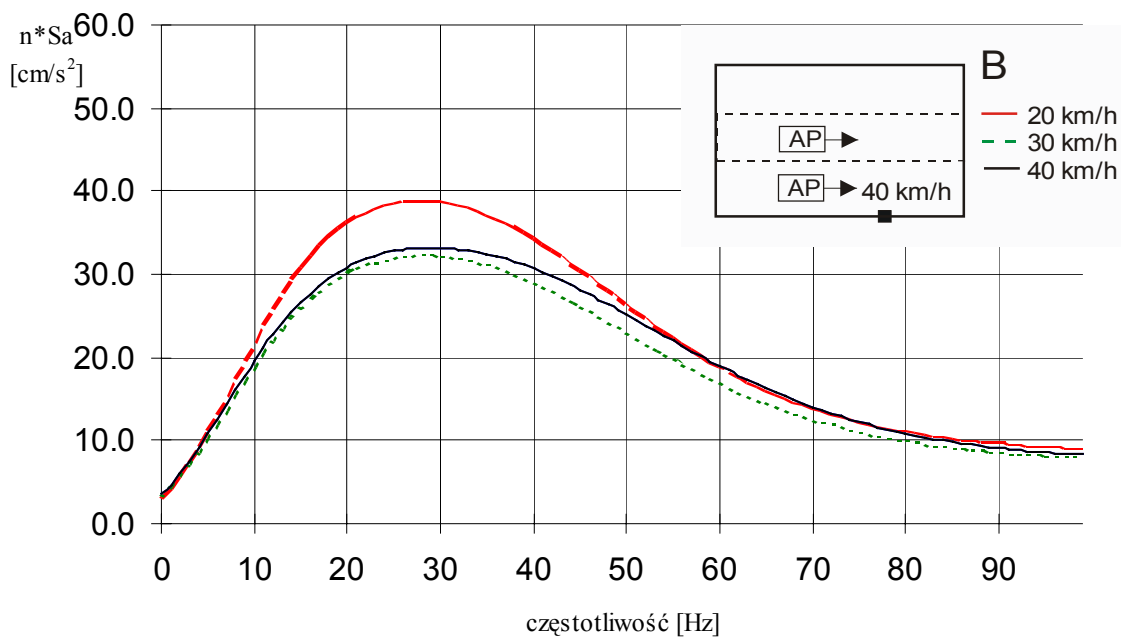
Rys. 6.2.15a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.15.



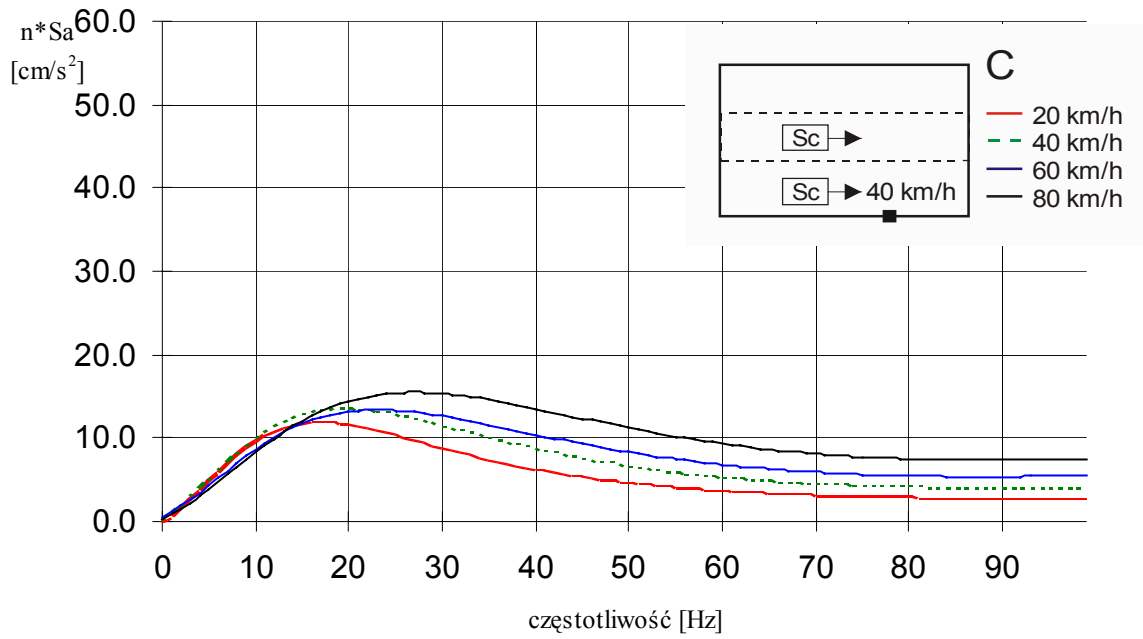
Rys. 6.2.16a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.16.

**Tablica 6.2.4** Charakterystyka przejazdów kombinacji pojazdów przez badane przekroje odpowiadających warunkom rozpatrywanym poprzednio na rys. 6.2.7, 6.2.11 oraz 6.2.17.

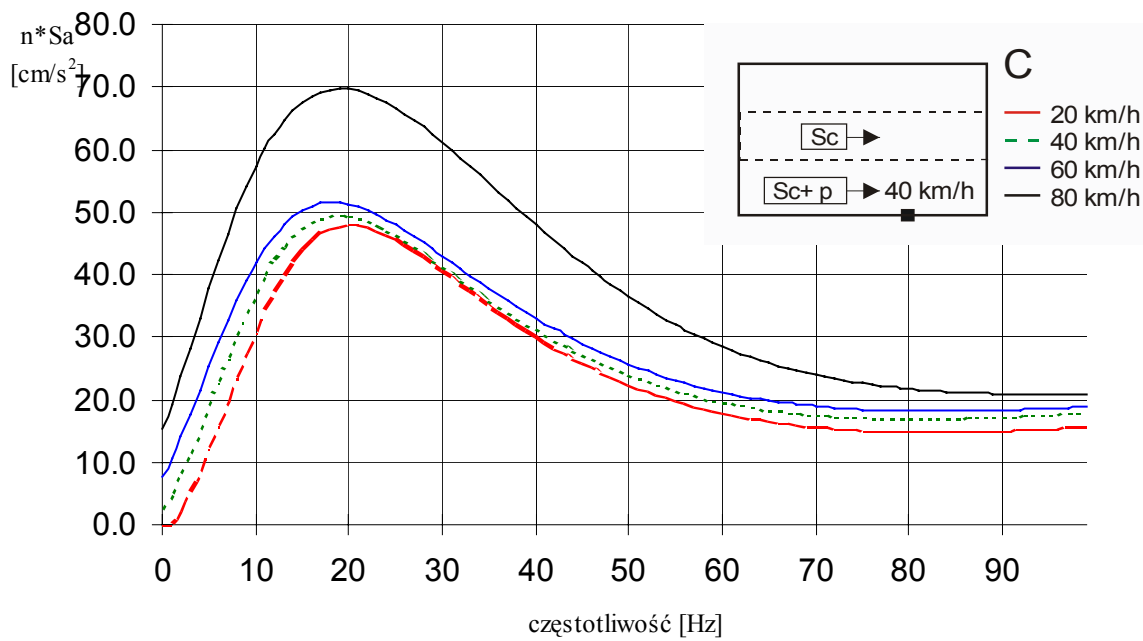
Nr	Typ i prędkość pojazdu poruszającego się po pasie:		Badany przekrój	$A_{max}$ [cm/s <sup>2</sup> ]	n [-]	Wykresy zamieszczone na rysunkach:
	pierwszym [km/h]	drugim [km/h]				
1	AP - 40	AP - 20	B	3.76	2.22	Por. rys. 6.2.17 oraz rys. 6.2.17a
2	AP - 40	AP - 30		3.82	1.72	
3	AP - 40	AP - 40		4.38	1.53	
4	Sc - 40	Sc - 20	C	2.97	1.94	Por. rys. 6.2.7 oraz rys. 6.2.7a
5	Sc - 40	Sc - 40		3.19	1.82	
6	Sc - 40	Sc - 60		3.00	1.78	
7	Sc - 40	Sc - 80		3.64	1.72	
8	Sc+p - 40	Sc - 20	B	9.02	2.41	Por. rys. 6.2.11 oraz rys. 6.2.11a
9	Sc+p - 40	Sc - 40		9.64	2.20	
10	Sc+p - 40	Sc - 60		10.40	1.92	
11	Sc+p - 40	Sc - 80		11.97	1.90	



**Rys. 6.2.17a** Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.17.



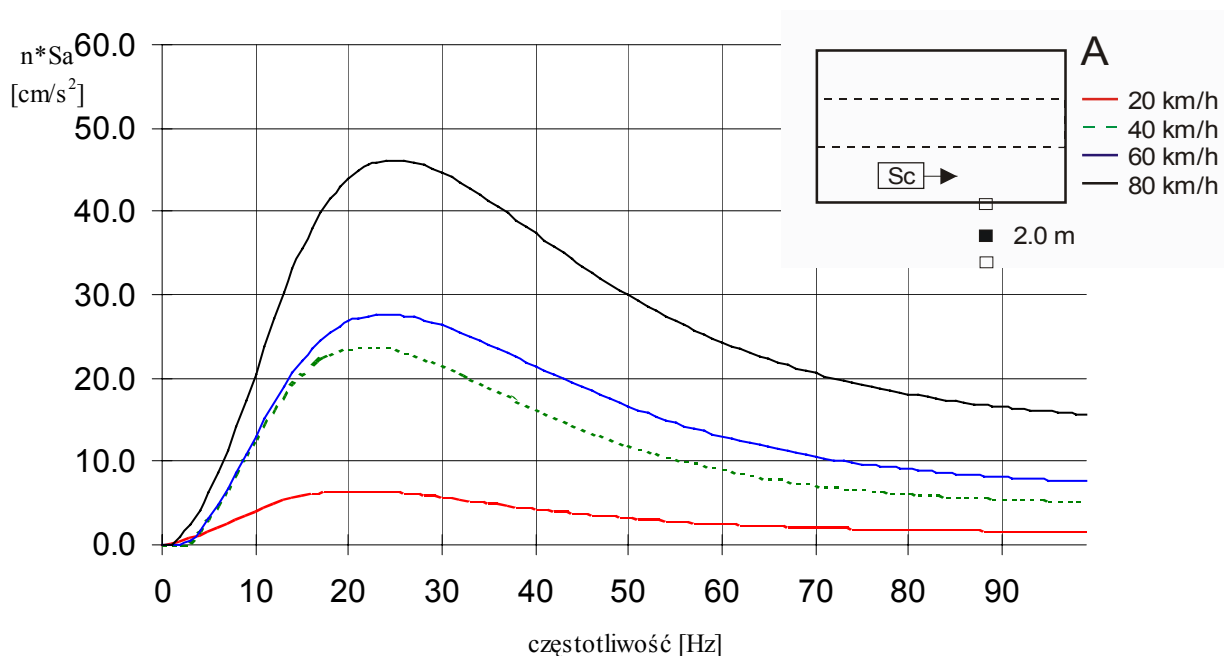
Rys. 6.2.7a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.7.



Rys. 6.2.11a Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi wyznaczone w sytuacji rozpatrywanej na rys. 6.2.11.

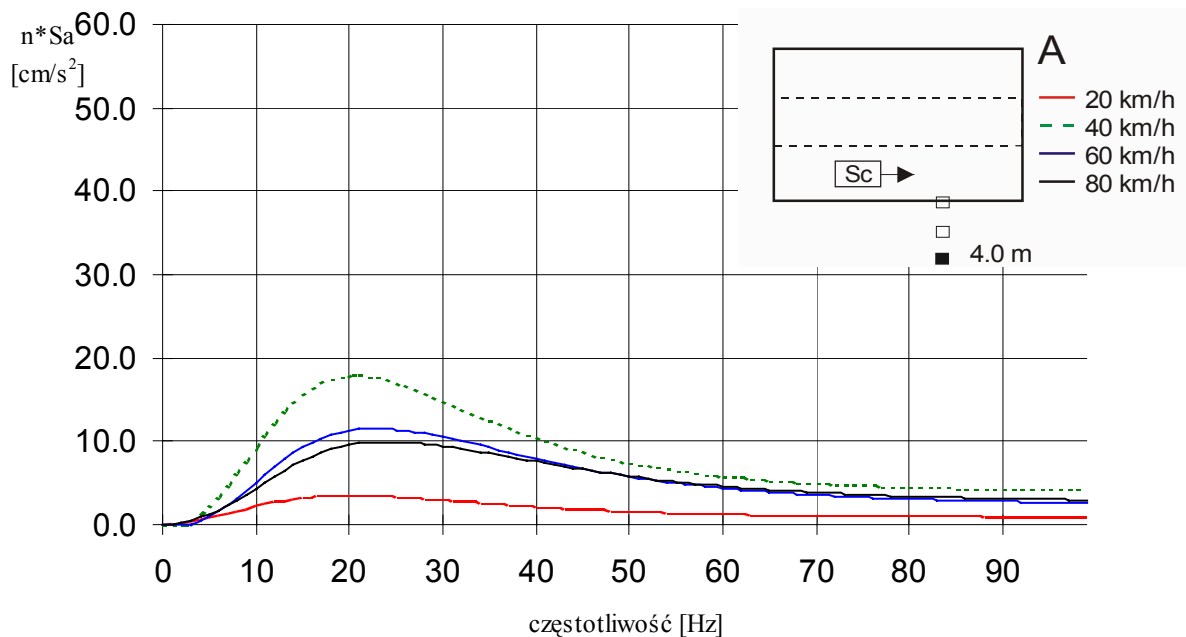
### 6.3 Analiza wpływu czynników związanych z drogą propagacji drgań

Model umożliwiający wyznaczanie przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi zbudowany za pomocą SSN zastosowano do analizy umożliwiającej przeprowadzenie oceny wpływu parametrów związanych z drogą przejścia drgań od ich źródła do odbiornika na kształt spektrum odpowiedzi. Na kolejnych rysunkach podano wykresy linii spektralnych uzyskane przy przejeździe różnych pojazdów przez przekroje typu A, B i C. Przedstawione wyniki uzyskano przy założeniu, iż przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi dotyczy drgań w odległości 2, 4 i 6 m od krawędzi jezdni. Wyniki analiz przedstawione są jako przyspieszeniowe spektra odpowiedzi  $S_a$  wyznaczone z uwzględnieniem współczynnika  $n$ . Taka forma prezentacji została uzasadniona już wcześniej w rozdz. 6.2.

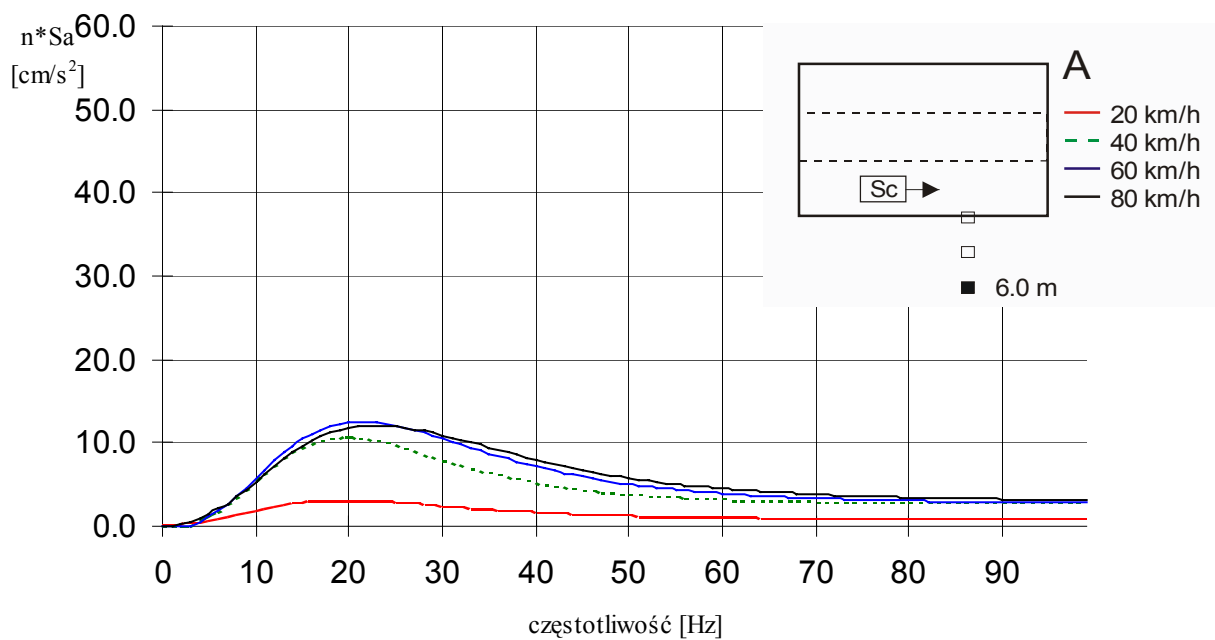


**Rys.6.3.1** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 2.0 m od krawędzi drogi w przekroju A od przejazdu samochodu ciężarowego po pasie 1 z prędkościami 20-80 km/h.

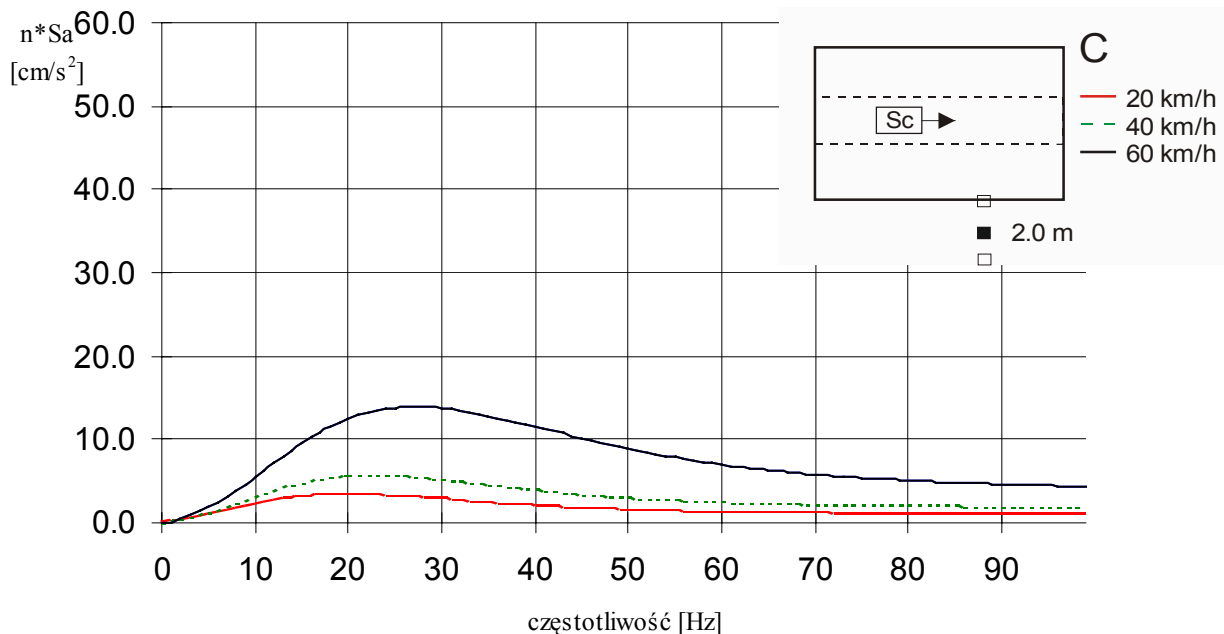
Wykresy spektralne podane na rys. 6.3.1 związane są z przejazdem pojedynczego samochodu ciężarowego w przekroju A w odległości 2.0 m od krawędzi jezdni. Odpowiadają one drganiom na gruncie. Prędkość przejazdu pojazdu była zmieniana od 20 do 80 km/h. Wzrost prędkości przejazdu powoduje wzrost rzędnych linii spektralnych. Na następnych wykresach zamieszczono przyspieszeniowe spektra odpowiedzi przy przejeździe tego samego typu pojazdu. Odpowiadają one jednak drganiom na gruncie w odległości 4.0 m od krawężnika (rys. 6.3.2) oraz 6.0 m od krawędzi jezdni (rys. 6.3.3). Widoczne jest wyraźne zmniejszenie maksymalnych rzędnych spektralnych wraz ze zwiększaniem się odległości od jezdni. Podobny wpływ warunków ruchowo-drogowych (typ pojazdu, prędkość jazdy) na spektrum odpowiedzi przy przejeździe pasem 2 samochodu ciężarowego w przekroju C, przedstawiono na wykresach zamieszczonych na rys. 6.3.4, 6.3.5 i 6.3.6. W odległości 2.0 i 4.0 m od krawędzi jezdni wyraźnie uwidocznił się w wartościach rzędnych linii spektralnych jako znaczący wpływ prędkości przejazdu 60 km/h. W odległości 6.0 m od krawężnika obserwuje się już niewielki wpływ prędkości przejazdu na wartości rzędnych linii spektralnych.



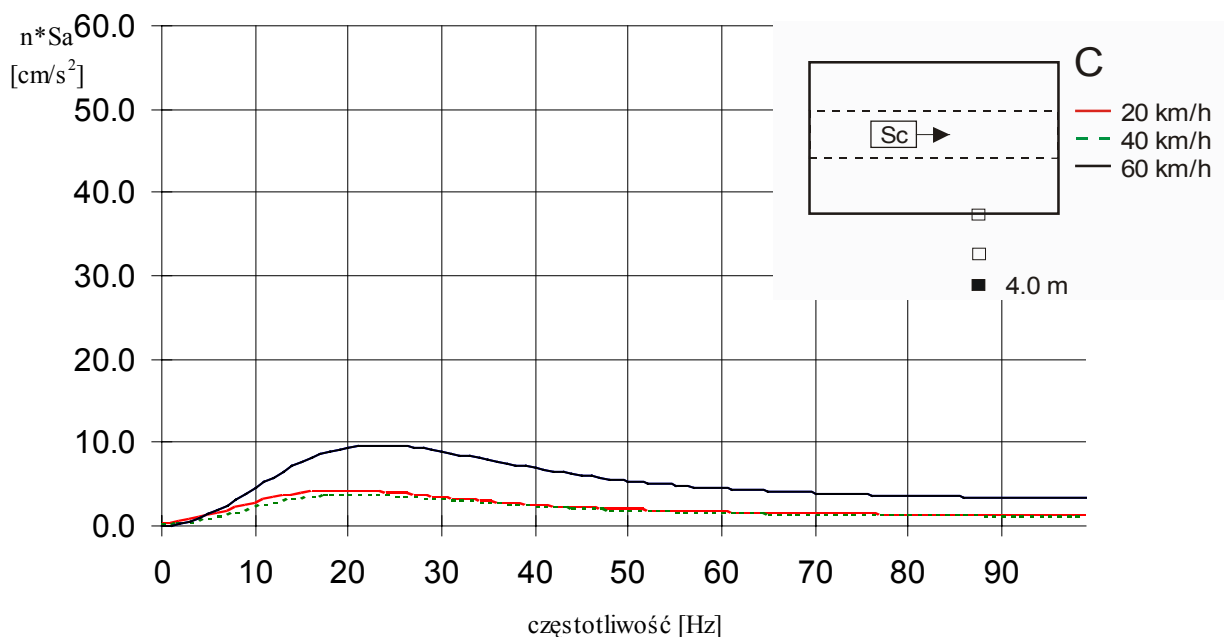
**Rys.6.3.2** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju A od przejazdu samochodu ciężarowego po pasie 1, z prędkościami 20-80 km/h.



**Rys.6.3.3** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 6.0 m od krawędzi jezdni w przekroju A od przejazdu samochodu ciężarowego po pasie 1, z prędkościami 20-80 km/h.

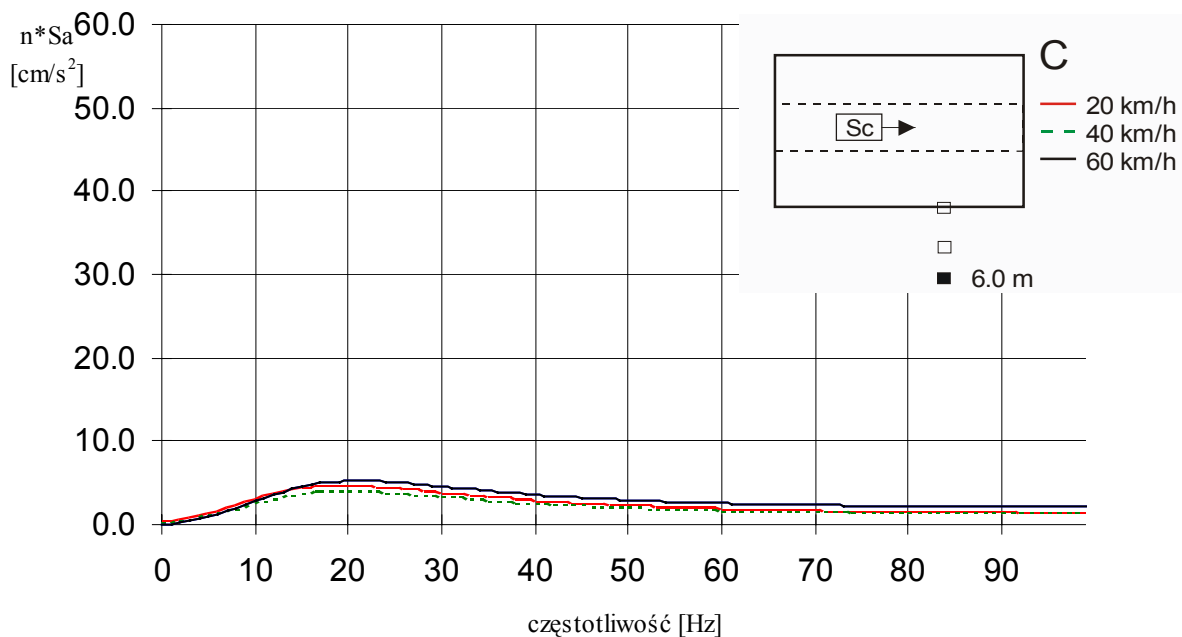


**Rys.6.3.4** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 2.0 m od krawędzi jezdni w przekroju C od przejazdu samochodu ciężarowego po pasie 2, z prędkościami 20-60 km/h.

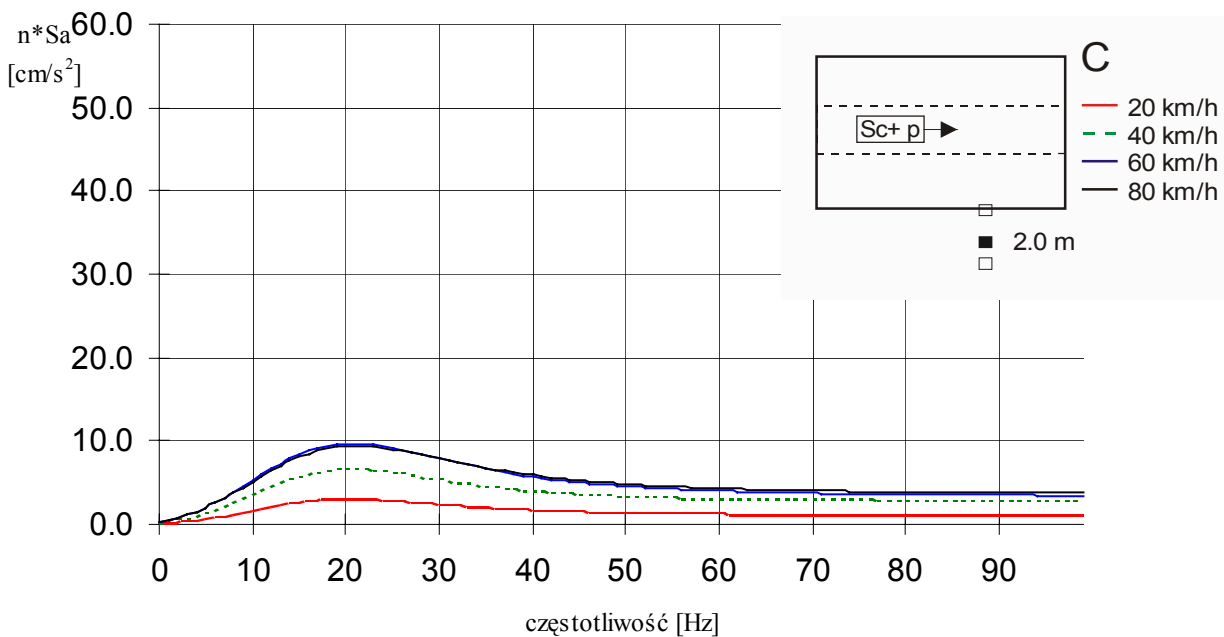


**Rys.6.3.5** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju C od przejazdu samochodu ciężarowego po pasie 2, z prędkościami 20-60 km/h..

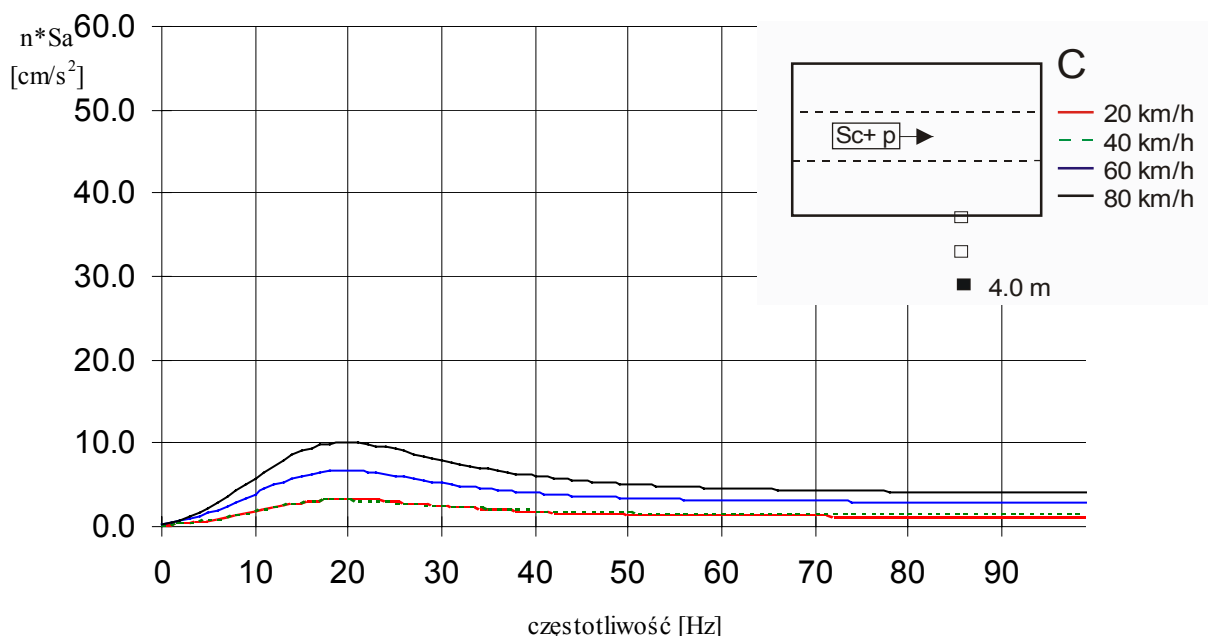




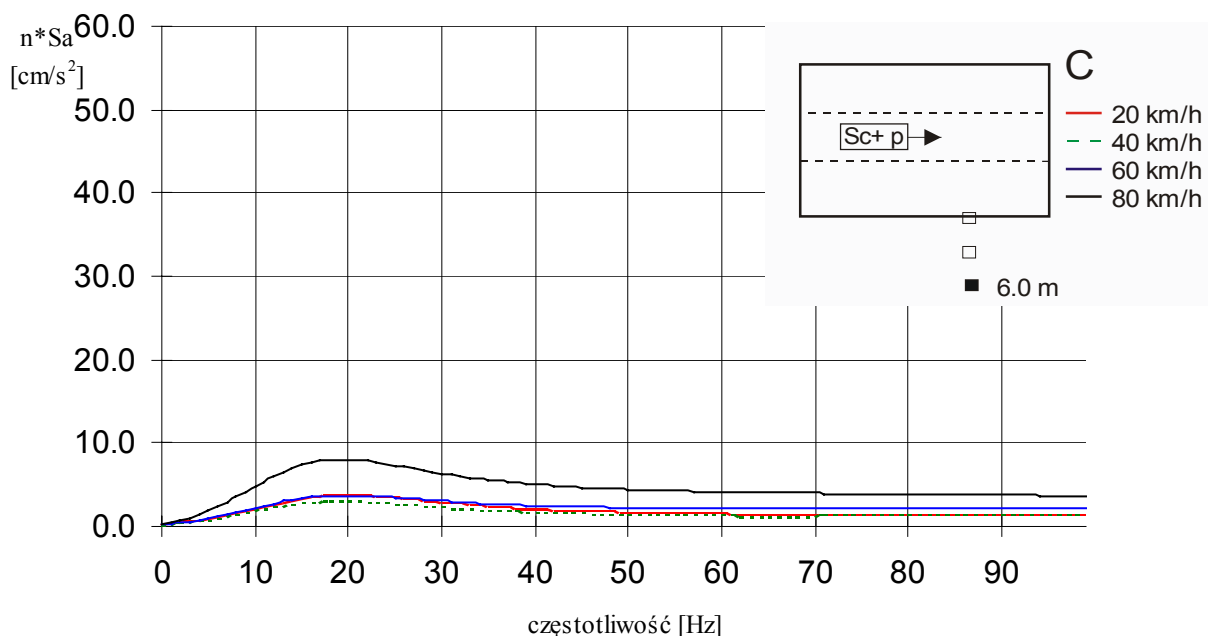
**Rys.6.3.6** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 6.0 m od krawędzi jezdni w przekroju C od przejazdu samochodu ciężarowego po pasie 2, z prędkościami 20-60 km/h.



**Rys.6.3.7** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 2.0 m od krawędzi jezdni w przekroju C od przejazdu samochodu ciężarowego z przyczepą (naczepą) po pasie 2, z prędkościami 20-80 km/h.



**Rys.6.3.8** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju C od przejazdu samochodu ciężarowego z przyczepą (naczepą) po pasie 2, z prędkościami 20-80 km/h.

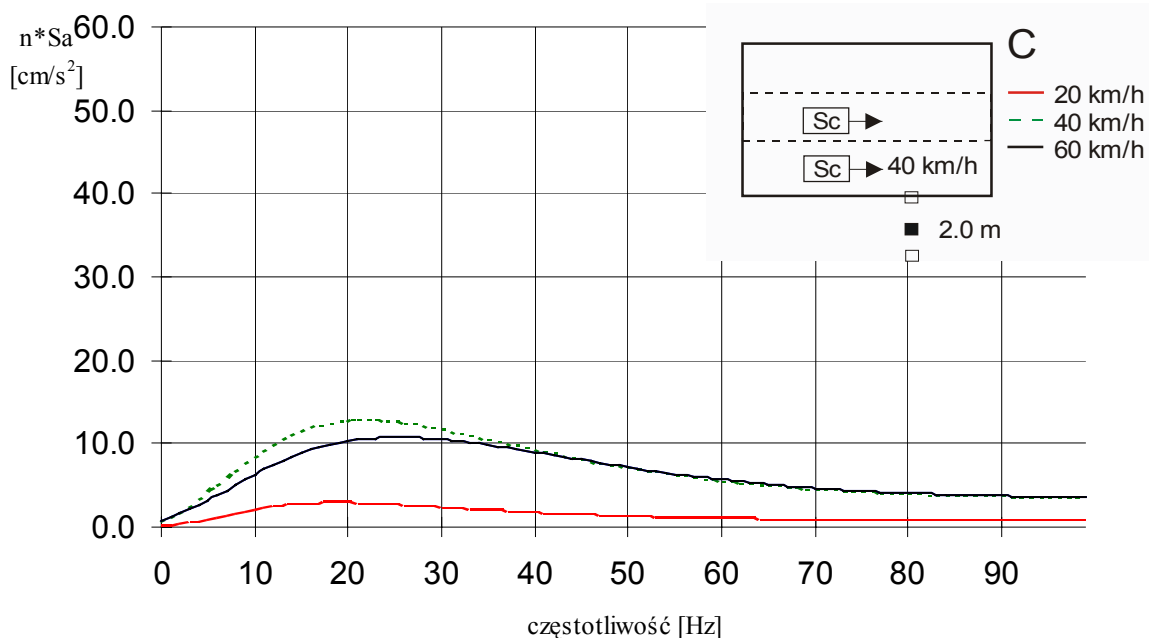


**Rys.6.3.9** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 6.0 m od krawędzi jezdni w przekroju C od przejazdu samochodu ciężarowego z przyczepą (naczepą) po pasie 2, z prędkościami 20-80 km/h.

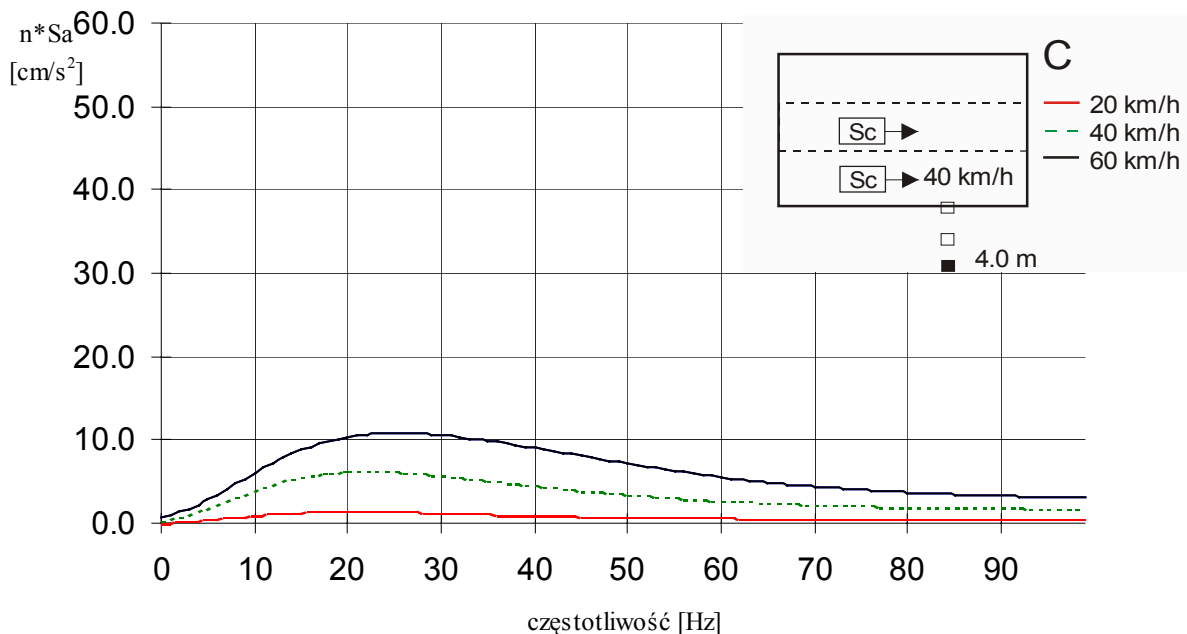
Odpowiednie wykresy przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi przy przejeździe samochodu ciężarowego z przyczepą (naczepą) przez przekrój C pasem drugim z prędkościami od 20 do 80 km/h zestawiono na rys. 6.3.7-6.3.9. Rzędne wykresów wraz z odległością od krawędzi jezdni maleją. W odległości 6.0 m od krawędzi jezdni rzędne te są wyraźnie niższe (rys.6.3.9). Redukcja rzędnych krzywych spektralnych przy przejeździe pojazdu z dużą prędkością (80 km/h) jest wyraźnie mniejsza od redukcji występującej przy przejazdach z mniejszymi prędkościami. Tu także potwierdzają się wcześniejsze spostrzeżenia (por. rozdz. 6.2) co do mniejszego działania dynamicznego wywołanego przejazdem samochodów ciężarowych z przyczepą (naczepą) niż wywołane przejazdem samochodu ciężarowego. Zapewne lepsze jest resorowanie tych pierwszych i stąd stwierdzony efekt na krzywych spektralnych.

Badano również efekt jednoczesnego przejazdu pojazdów poruszających się po dwóch pasach. Na kolejnych rysunkach (6.3.10 – 6.3.12) zestawiono przyspieszeniowe spektra odpowiedzi od przejazdu dwóch samochodów ciężarowych, z których jeden (jadący po pasie 1) porusza się z prędkością 40 km/h a przejazd drugiego odbywa się z różnymi prędkościami (od 20 do 60 km/h). Zauważa się, że przejazd dwóch pojazdów nie wywołuje znaczniejszych zmian rzędnych spektrów odpowiedzi w porównaniu z rzędnymi od przejazdu pojedynczego pojazdu.

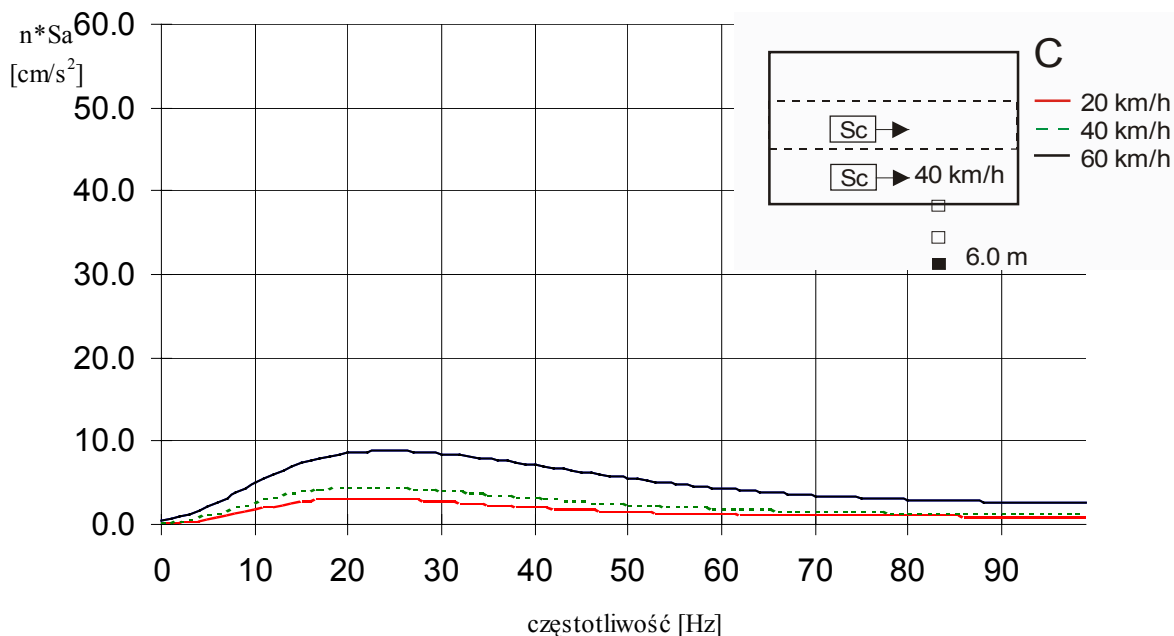
Wykresy spektralne odnoszące się do przejazdów autobusów w przekrojach pomiarowych podano na kolejnych rysunkach. Wykresy na rys. 6.3.13 uzyskano przy przejeździe autobusu przegubowego po pasie pierwszym w przekroju B z prędkościami 20-40 km/h. Krzywe spektralne dotyczą drgań w odległości 2.0 m od krawędzi jezdni. Na kolejnym rys. 6.3.14 zestawiono odpowiednie wykresy przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi wyznaczone w punkcie usytuowanym w odległości 4.0 m od krawędzi jezdni. Redukcja rzędnych linii spektralnych jest wyraźnie widoczna i największa występuje przy prędkości 30 km/h.



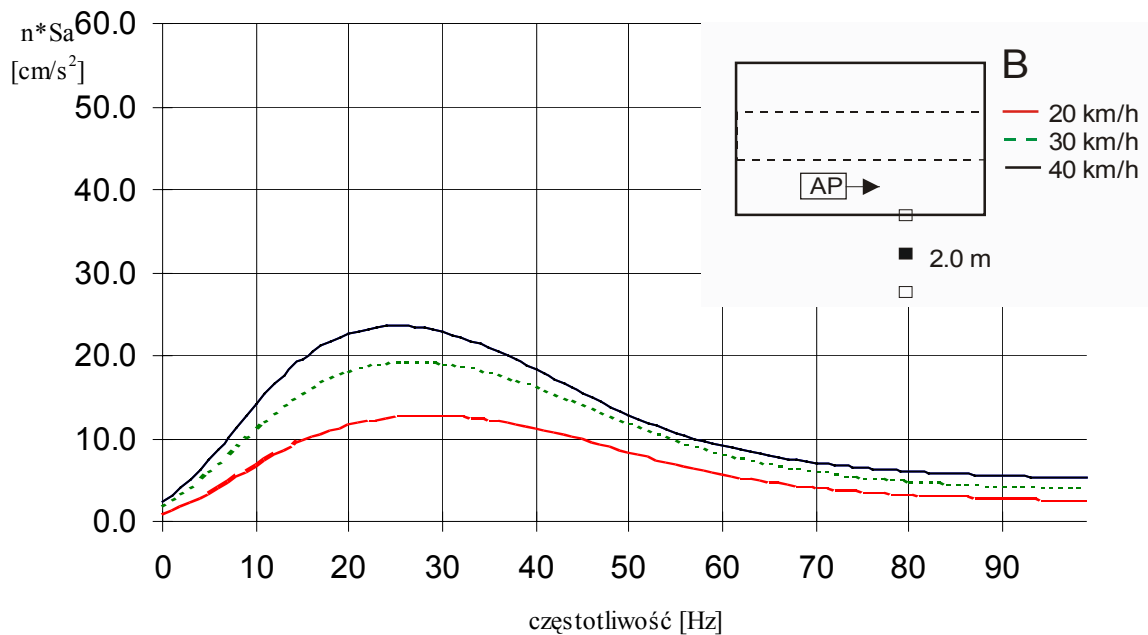
**Rys.6.3.10** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 2.0 m od krawędzi jezdni w przekroju C przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 1 z prędkością 40 km/h i jednoczesnym przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 2 z prędkościami 20-60 km/h.



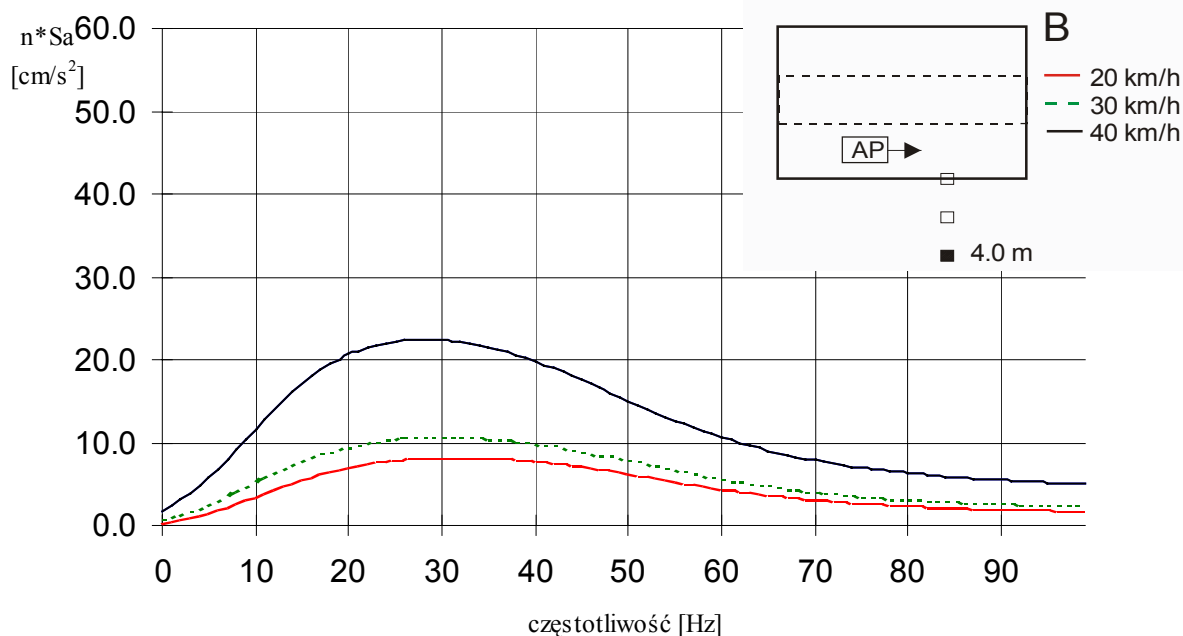
**Rys.6.3.11** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju C przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 1 z prędkością 40 km/h i jednoczesnym przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 2 z prędkościami 20-60 km/h.



**Rys.6.3.12** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 6.0 m od krawędzi jezdni w przekroju C przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 1 z prędkością 40 km/h i jednoczesnym przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 2 z prędkościami 20-60 km/h.

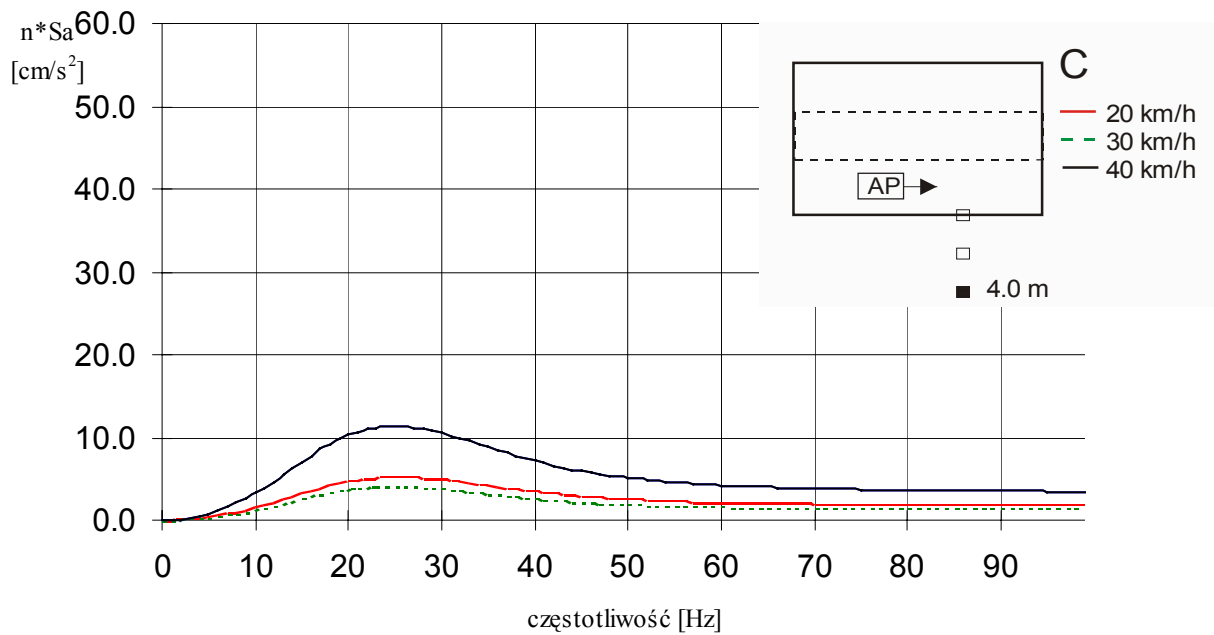


**Rys.6.3.13** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 2.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B przy przejeździe autobusu przegubowego po pasie 1, z prędkościami 20-40 km/h.

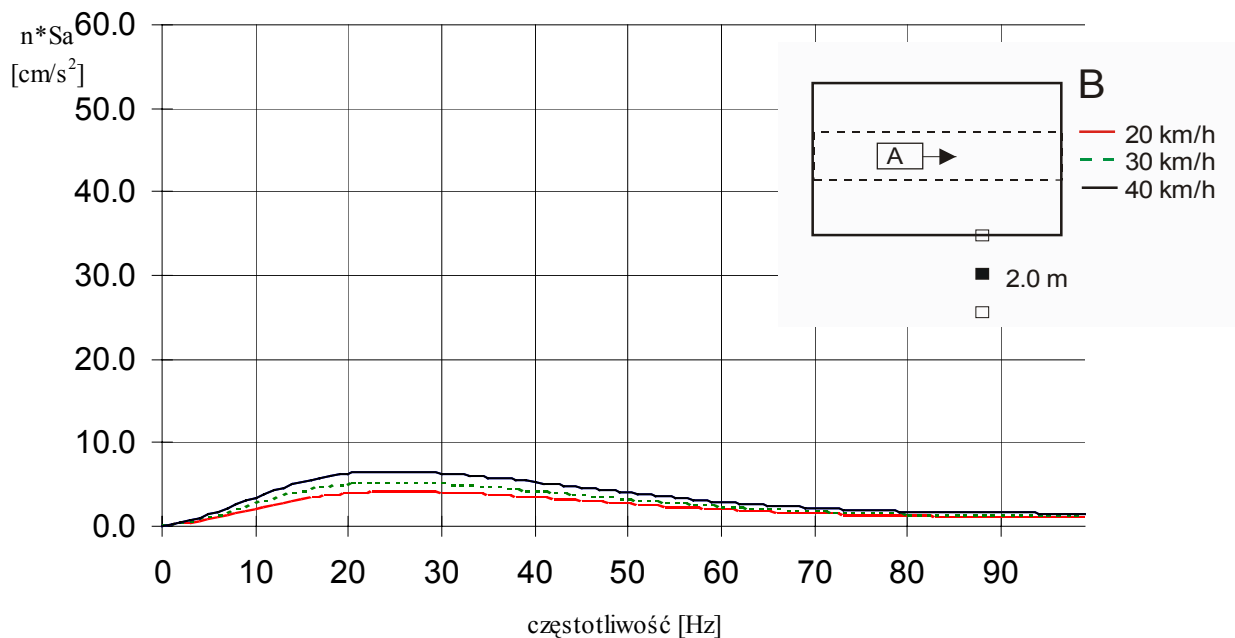


**Rys.6.3.14** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B przy przejeździe autobusu przegubowego po pasie 1, z prędkościami 20-40 km/h.

Przejazd autobusu przegubowego przez przekrój C przy zachowaniu takich samych jak wyżej parametrów ruchowych (rys. 6.3.14) wywołuje drgania, którym odpowiadające przyspieszeniowe spektra odpowiedzi podano na rys. 6.3.15. Dysponując podanymi rysunkami można dokonać porównań krzywych spektralnych w różnych warunkach ruchowo-drogowych.



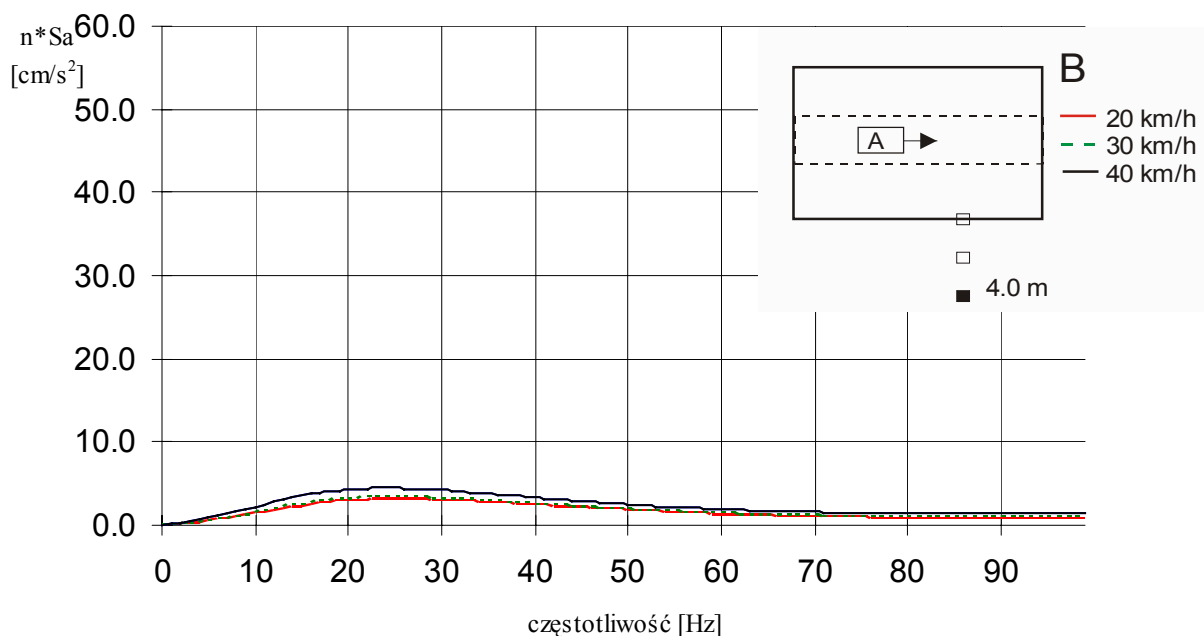
**Rys.6.3.15** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju C przy przejeździe autobusu przegubowego po pasie 1, z prędkościami 20-40 km/h..



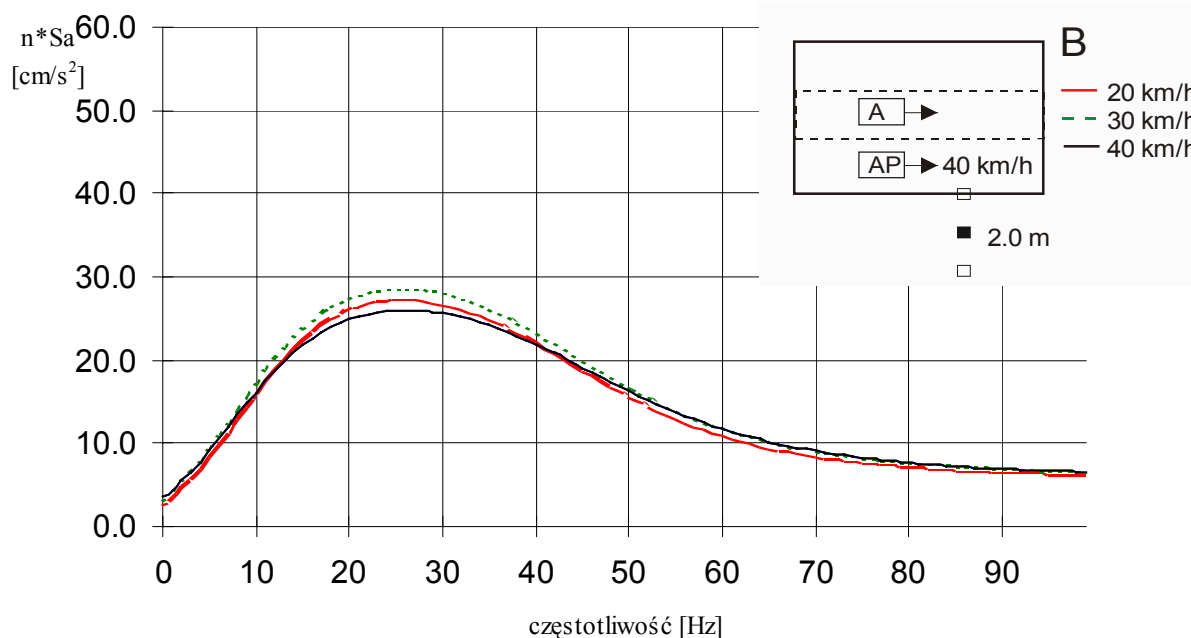
**Rys.6.3.16** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 2.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B przy przejeździe autobusu po pasie 2, z prędkościami 20-40 km/h.

I tak np. przejazd autobusu przegubowego w przekroju C przy prędkości 40 km/h prowadzi do linii spektralnych o rzędnych większych od uzyskanych przy przejeździe dwóch samochodów ciężarowych z tą samą prędkością 40 km/h (rys. 6.3.11 oraz np. 6.3.15).

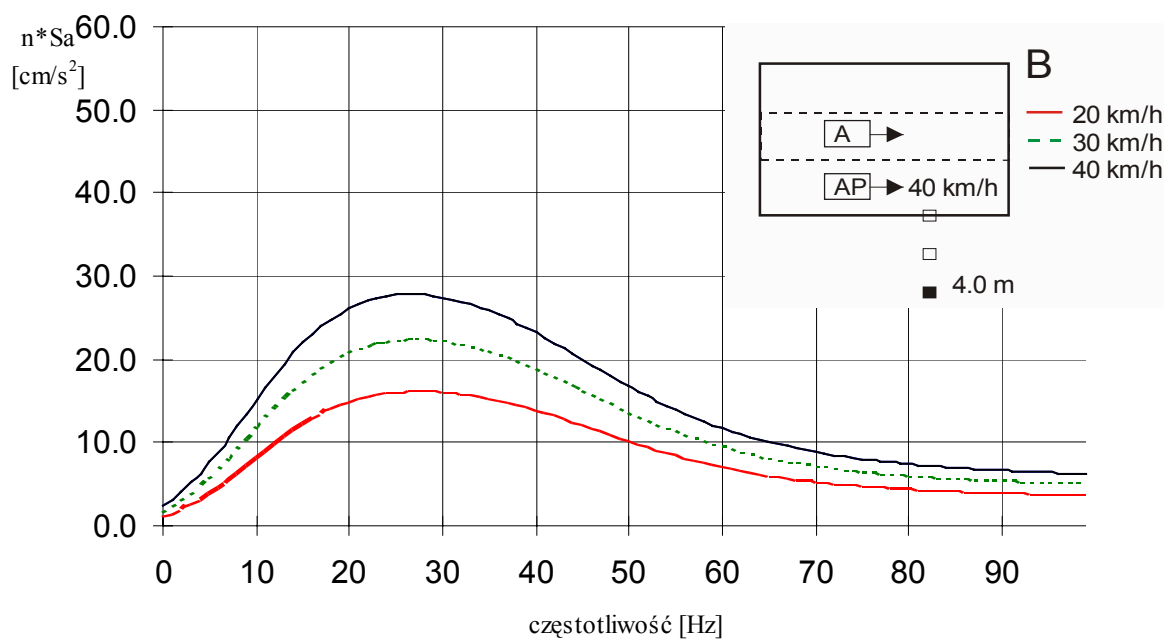
Warto też zwrócić uwagę na wynik porównania wykresów zamieszczonych na rys. 6.3.14 i 6.3.15. Obydwa dotyczą podobnych warunków ruchowych, odpowiadają jednak dwóm różnym przekrojom (B i C). Przejazd autobusu przegubowego w przekroju B prowadzi do wyraźnie większych rzędnych linii spektralnych. Wyraźnie mniejszy jest efekt przejazdu autobusu po pasie drugim. Zauważa się to analizując krzywe podane na rys. 6.3.16 i 6.3.17.



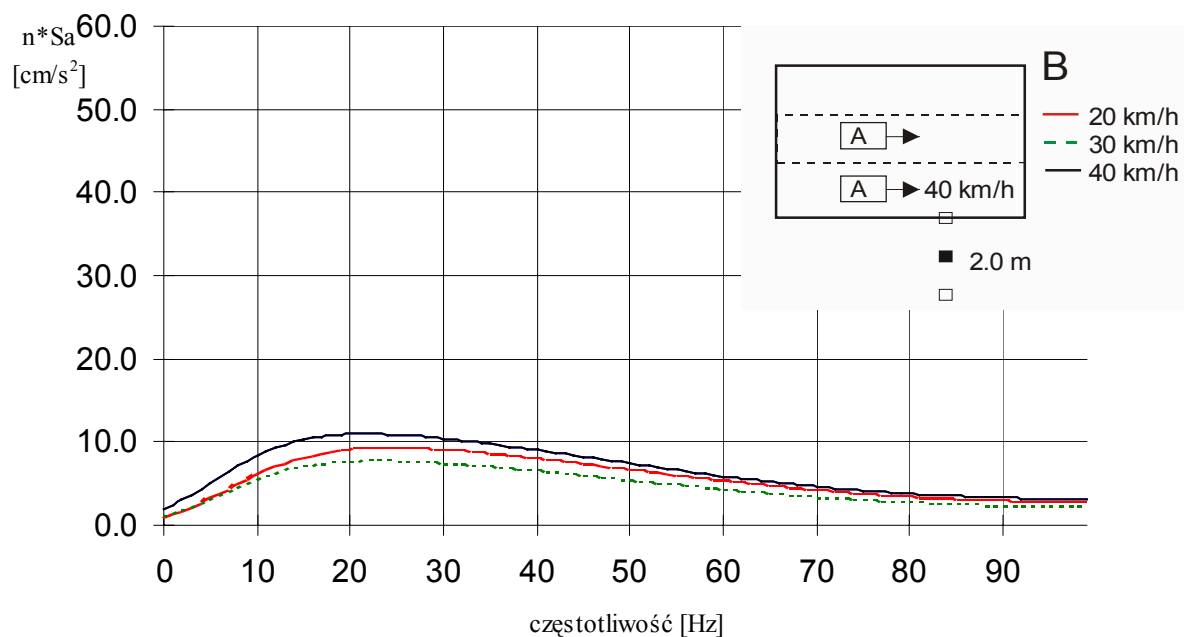
**Rys.6.3.17** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B przy przejeździe autobusu po pasie 2, z prędkościami 20-40 km/h.



**Rys.6.3.18** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 2.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B przy przejeździe autobusu przegubowego po pasie 1 z prędkością 40 km/h i jednoczesnym przejeździe autobusu po pasie 2 z prędkościami 30-40 km/h.

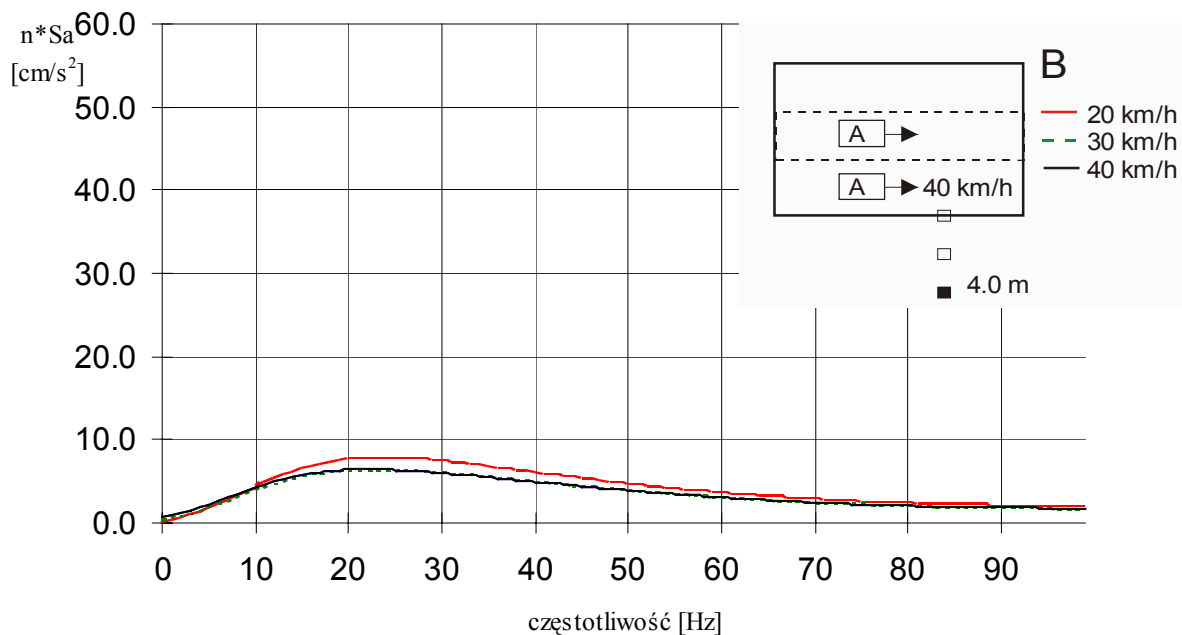


**Rys.6.3.19** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B przy przejeździe autobusu przegubowego po pasie 1 z prędkością 40 km/h i jednoczesnym przejeździe autobusu po pasie 2 z prędkościami 30-40 km/h.

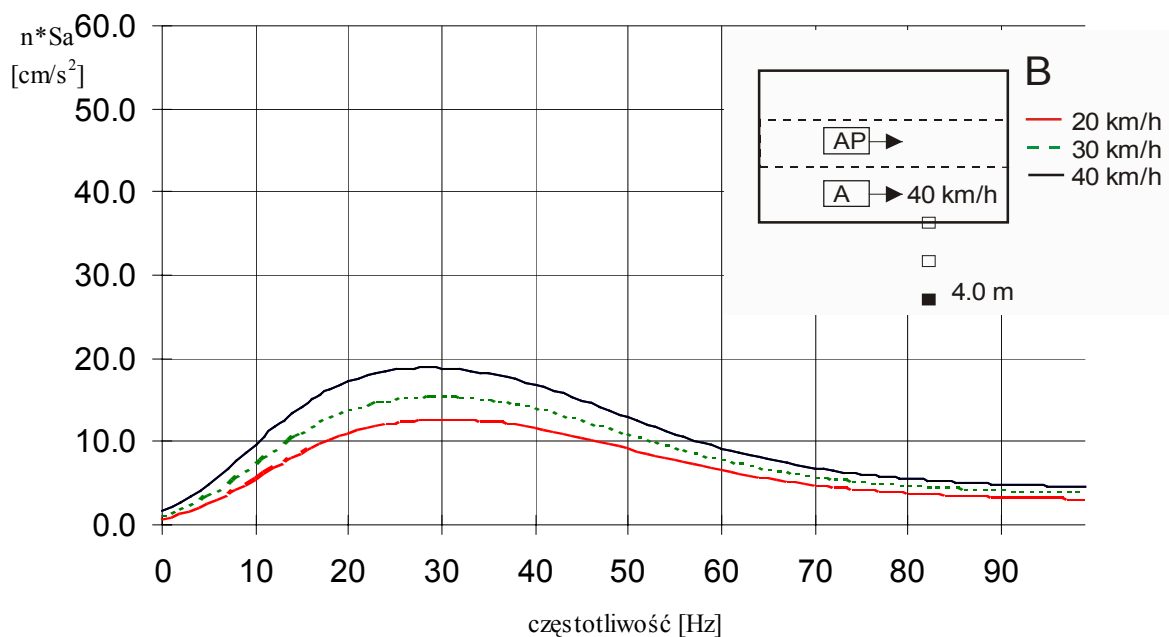


**Rys.6.3.20** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 2.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B przy przejeździe autobusu po pasie 1 z prędkością 40 km/h i jednoczesnym przejeździe autobusu po pasie 2 z prędkościami 30-40 km/h.





**Rys.6.3.21** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B przy przejeździe autobusu po pasie 1 z prędkością 40 km/h i jednoczesnym przejeździe autobusu po pasie 2 z prędkościami 30-40 km/h.



**Rys.6.3.22** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w odległości 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B przy przejeździe autobusu po pasie 1 z prędkością 40 km/h i jednoczesnym przejeździe autobusu przegubowego po pasie 2 z prędkościami 20-40 km/h.

Kolejne wykresy obrazują wpływ przejazdu pojazdów poruszających się pasami 1 i 2. Na rys 6.3.18 i 6.3.19 linie spektralne dotyczą przejazdu autobusu przegubowego pasem 1 z prędkością 40 km/h i pasem 2 autobusu ze zmienną prędkością. Z porównań wykresów podanych na rys. 6.3.14 (przy prędkości 40 km/h) oraz na rys. 6.3.19 zauważa się, że autobus jadący drugim pasem wyraźnie zwiększa rzędne spektrum odpowiedzi dopiero, gdy

jego przejazd następuje z prędkością 40 km/h. Przy prędkości przejazdu autobusu równej 30 km/h nie zauważa się jego wpływu na wykres przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. Na rys. 6.3.20 i 6.3.21 linie spektralne odnoszą się do przejazdu w przekroju B dwóch autobusów: po pasie 1 z prędkością 40 km/h i po pasie 2 ze zmienianą prędkością od 20-40 km/h. Rzędne linii spektralnych uzyskanych przy tych przejazdach są znacznie mniejsze od odpowiadających przejazdom pojedynczego autobusu przegubowego. Przejazd autobusu przegubowego pasem 2 w przekroju B, przy jednoczesnym występowaniu na pasie 1 autobusu jadącego z prędkością 40 km/h uwidoczniony został na rys. 6.3.22. Linie spektralne odpowiadają punktom na gruncie w odległości 4.0 m od krawędzi jezdni. Można je porównać z liniami podanymi na rys. 6.3.19. Widoczny jest i tu wyraźnie większy efekt dynamiczny przejazdu autobusu przegubowego od przejazdu autobusu (por. linie odpowiadające prędkości poruszania się obydwu pojazdów równej 40 km/h).

W niniejszym rozdziale zamieszczono tylko wybrane z wielu wykresów obrazujących przyspieszeniowe spektra odpowiedzi uzyskane w różnych warunkach ruchowo-drogowych. Na podstawie analizy tych i innych linii spektralnych można stwierdzić, że:

- ◆ wraz ze wzrostem odległości od krawędzi drogi następuje zmniejszenie rzędnych przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi,
- ◆ efekt przejazdu autobusów przegubowych uwidoczniony w rzędnych krzywych spektralnych jest większy niż wywołany przejazdem autobusów,
- ◆ efekt przejazdu samochodów ciężarowych uwidoczniony w rzędnych krzywych spektralnych jest większy niż wywołany przejazdem samochodów ciężarowych z przyczepami (naczepami); może to wynikać z lepszego resorowania tych ostatnich,
- ◆ efektem wzrostu prędkości przejazdu pojazdu przeważnie jest wzrost rzędnych krzywych spektralnych, chociaż można wskazać sytuacje ruchowo-drogowe (także na wykresach podanych w niniejszym rozdziale), w których zauważono efekty przeciwne.

#### 6.4 Analiza wpływu czynników związanych z odbiorem drgań przez budowlę

W tej części pracy analizuje się wpływ obiektu odbierającego drgania (budowli) na wykresy przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. Chodzi tu o to, aby ocenić w jakim stopniu wpłynie, na rzędne i kształt linii spektralnych, uwzględnienie w obliczeniach spektrum odpowiedzi drgań zarejestrowanych na fundamencie budowli (albo na ścianie fundamentowej w poziomie terenu). W [90] zaleca się, aby w obliczeniach sił bezwładności generowanych drganiami podłoża uwzględnić wibrogramy uzyskane w sposób opisany wyżej. Do grupy czynników związanych z odbiorem drgań przez budowlę zalicza się charakterystyki dynamiczne budowli oraz sposób jej posadowienia. Te pierwsze mogą być scharakteryzowane za pomocą częstotliwości i postaci drgań własnych. Na te wielkości mają wpływ kształt budowli, materiał z którego została wykonana (zarówno elementy nośne, jak i wypełniające), występowanie otworów, jakość wykonania, stan techniczny oraz właściwości tłumiące.

Podczas prowadzenia badań (por. rozdz. 3) przekroje pomiarowe umiejscowione były również w ten sposób, aby znajdowały się w nich niskie budynki posadowione w sąsiedztwie drogi. Punkty pomiarowe umieszczone na budynkach pozwoliły na zbieranie podczas badań danych o parametrach drgań występujących na fundamencie lub ścianie fundamentowej budynku. Wyznaczone na tej podstawie spektra odpowiedzi tworzyły zbiory danych do uczenia i testowania SSN. Na kolejnych rysunkach przedstawiono wykresy linii przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi od przejazdów pojazdów w danych przekrojach, a wyznaczone za pomocą SSN dla budowli położonej w danym przekroju w odległościach 2.0 i 4.0 m od krawędzi jezdni.

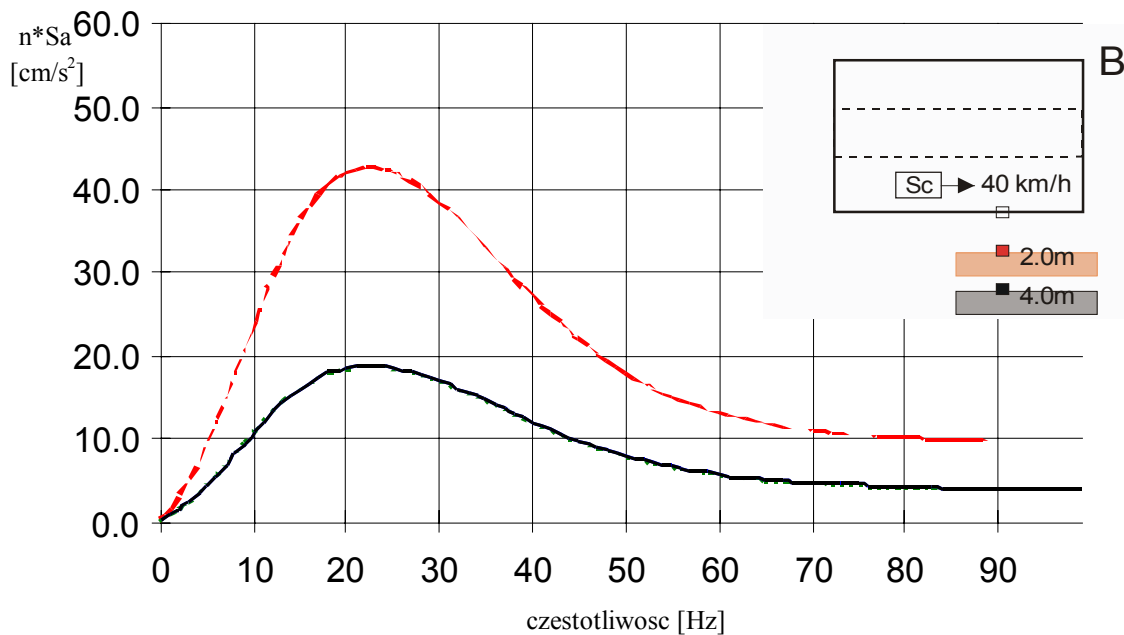
I tak przejazd samochodu ciężarowego w przekroju B daje na budowli w punkcie położonym w odległości 2.0 m od krawędzi jezdni znaczne rzędne przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi. Wraz ze wzrostem odległości od jezdni następuje ich wyraźna redukcja przy zachowaniu tej samej struktury częstotliwościowej (por. rys. 6.4.1).

Efekty przejazdu pojedynczych autobusów w przekroju B uwiadcniają kolejne wykresy podane tu na rys. 6.4.2, 6.4.3 i 6.4.4. Wraz ze wzrostem prędkości przejazdu rosną maksymalne rzędne spektralne wyznaczone w punktach na budowli w odległości 2.0 i 4.0 m. Jednak wpływ odległości budynku od źródła drgań przy przejeździe autobusu jest prawie niezauważalny. Ujawnia się wyraźnie w rzędnych linii spektralnych dopiero przy przejeździe autobusu przegubowego. (rys. 6.4.3). Wykresy na rys. 6.4.3 i 6.4.4 dobrze korespondują z rys. 6.3.13 i 6.3.14. Wykresy odpowiadające punktowi na budowli mają rzędne wyraźnie mniejsze od wyznaczonych w punkcie na gruncie.

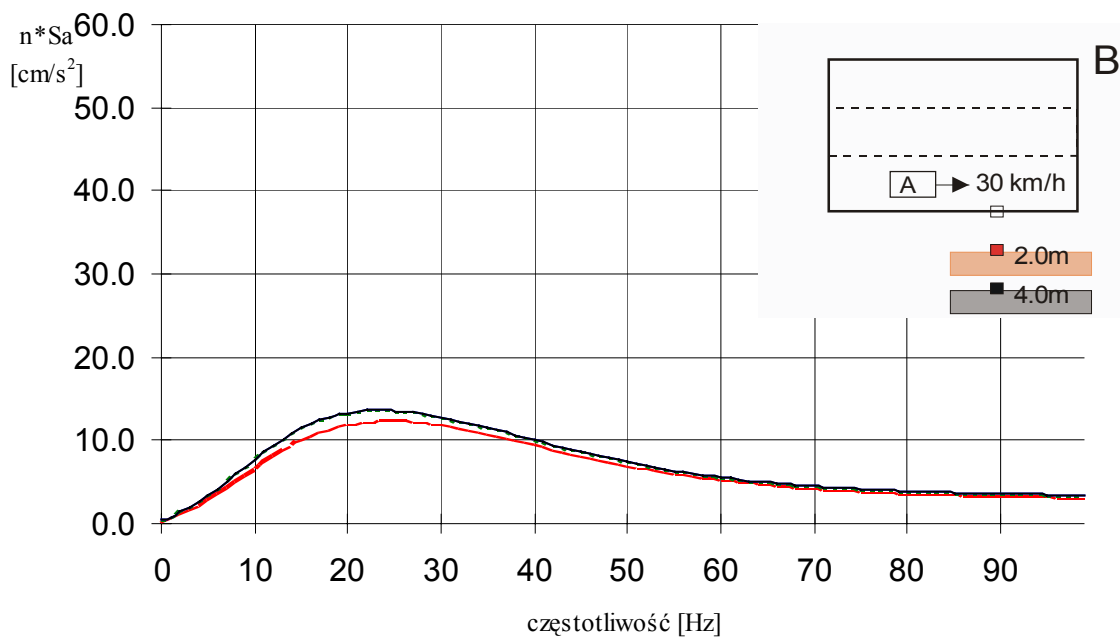
Równoczesny przejazd dwóch autobusów z prędkościami 30 km/h podano na rys. 6.4.5. W przekroju B analizowano też przejazd samochodu ciężarowego z przyczepą po pasie pierwszym, przy jednoczesnym przejeździe autobusu przegubowego poruszającego się po pasie drugim. Oba pojazdy poruszały się z prędkością 40 km/h (por. rys. 6.4.6.).

Na rys. 6.4.7 zaprezentowano przyspieszeniowe spektra odpowiedzi uzyskane przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie pierwszym w przekroju C z prędkością 80 km/h.

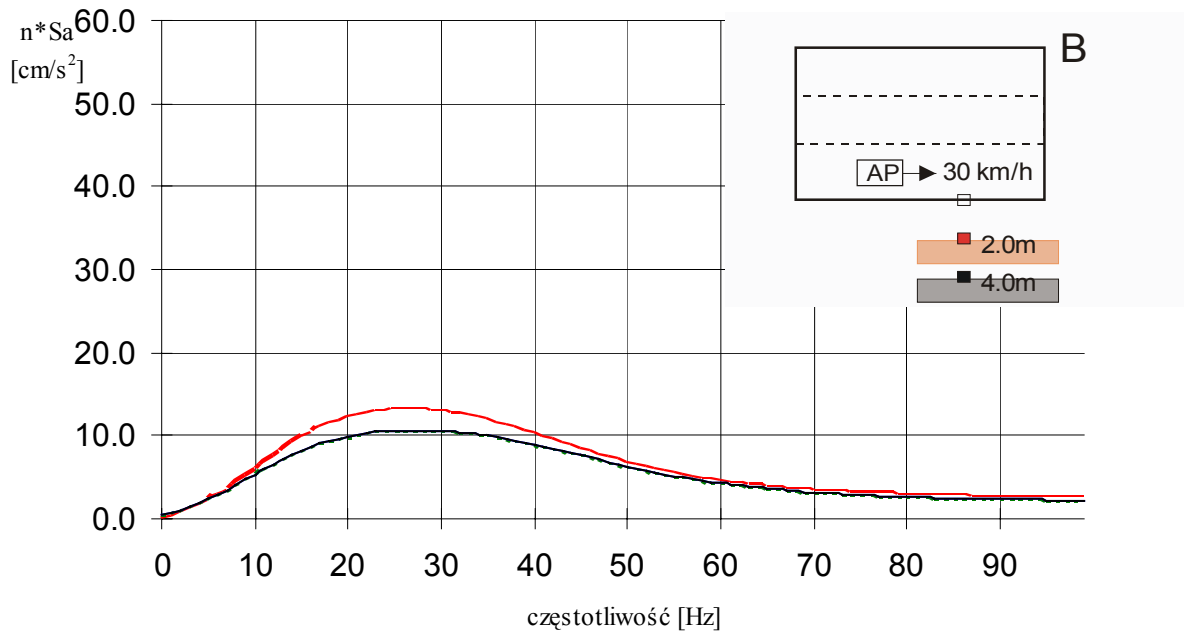
Na rys. 6.4.8 podano linie spektralne od przejazdu samochodu ciężarowego przez przekrój A z prędkością 40 km/h po pasie pierwszym. Za pomocą SSN wyznaczono linie przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi na budowli usytuowanej w odległości 2.0 i 4.0 m od krawędzi jezdni. Można te wykresy porównać z podobnymi na rys. 6.3.1 (prędkość 40 km/h) oraz na rys. 6.3.2. Widać wyraźnie, że budowla spełnia rolę filtra oraz redukuje rzędne linii spektralnych. W tym przypadku odległości budowli od krawędzi jezdni nie wpłynęła na linie spektralne.



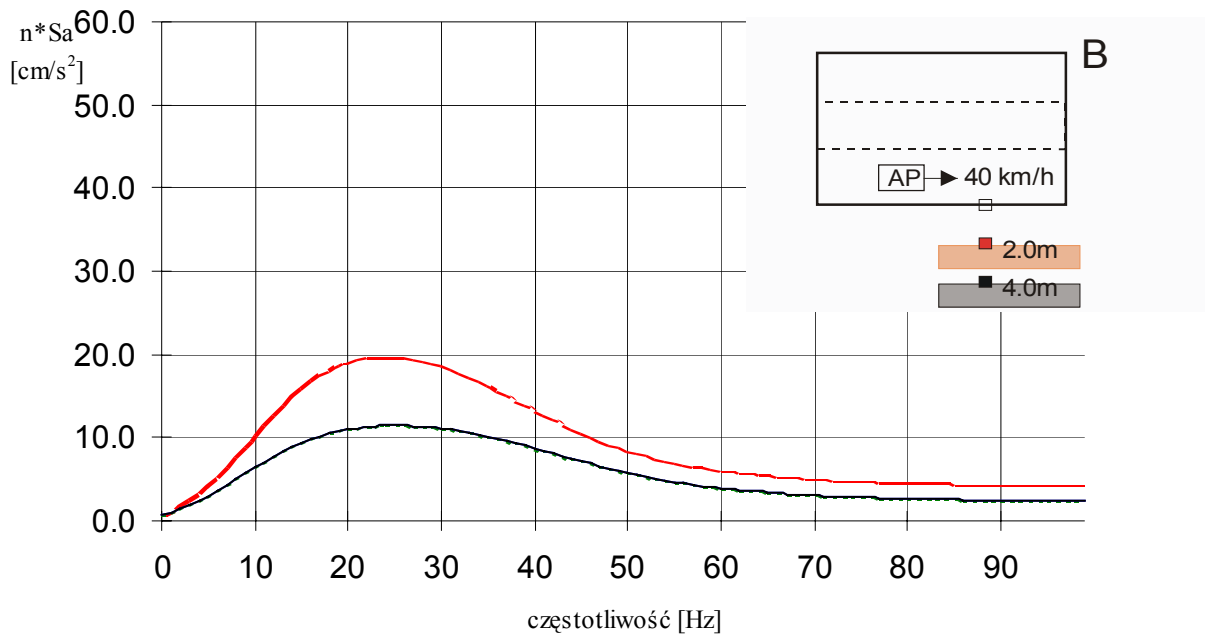
**Rys. 6.4.1** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w punkcie na budowli, w odległości 2.0 m i 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B, przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 1 z prędkością 40 km/h.



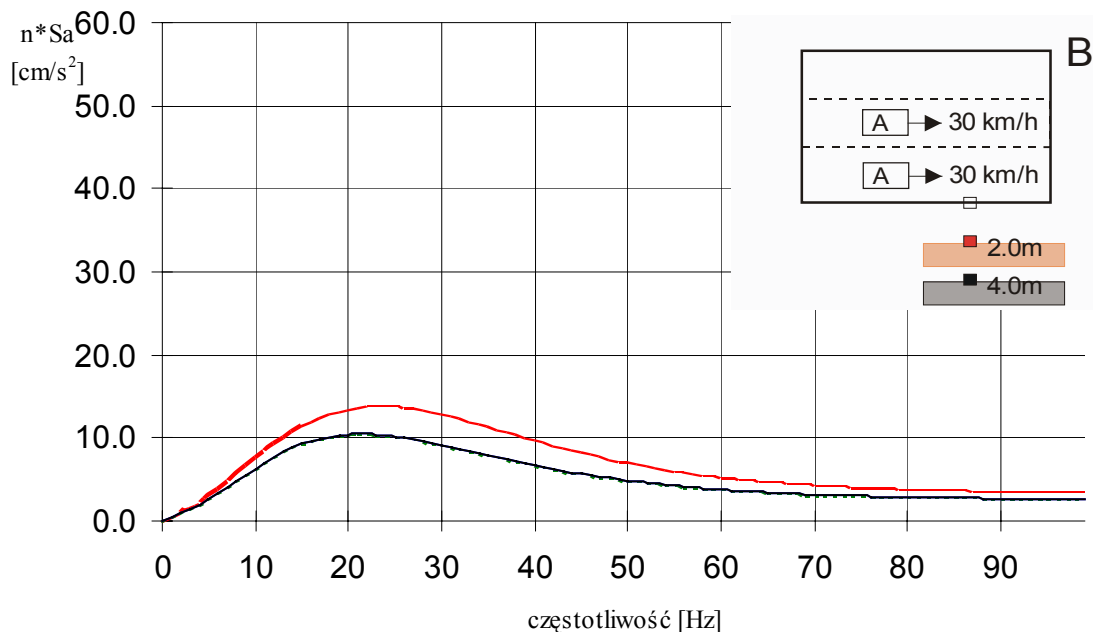
**Rys. 6.4.2** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w punkcie na budowli, w odległości 2.0 m i 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B, przy przejeździe autobusu po pasie 1 z prędkością 30 km/h.



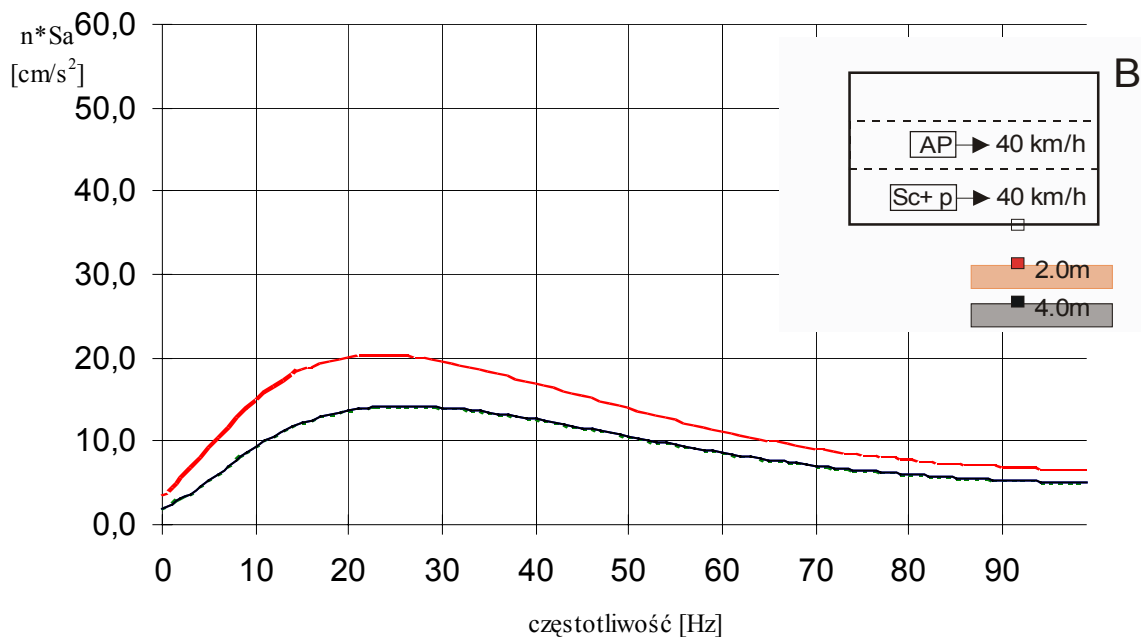
**Rys. 6.4.3** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w punkcie na budowlu, w odległości 2.0 m i 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B, przy przejeździe autobusu przegubowego po pasie 1 z prędkością 30 km/h.



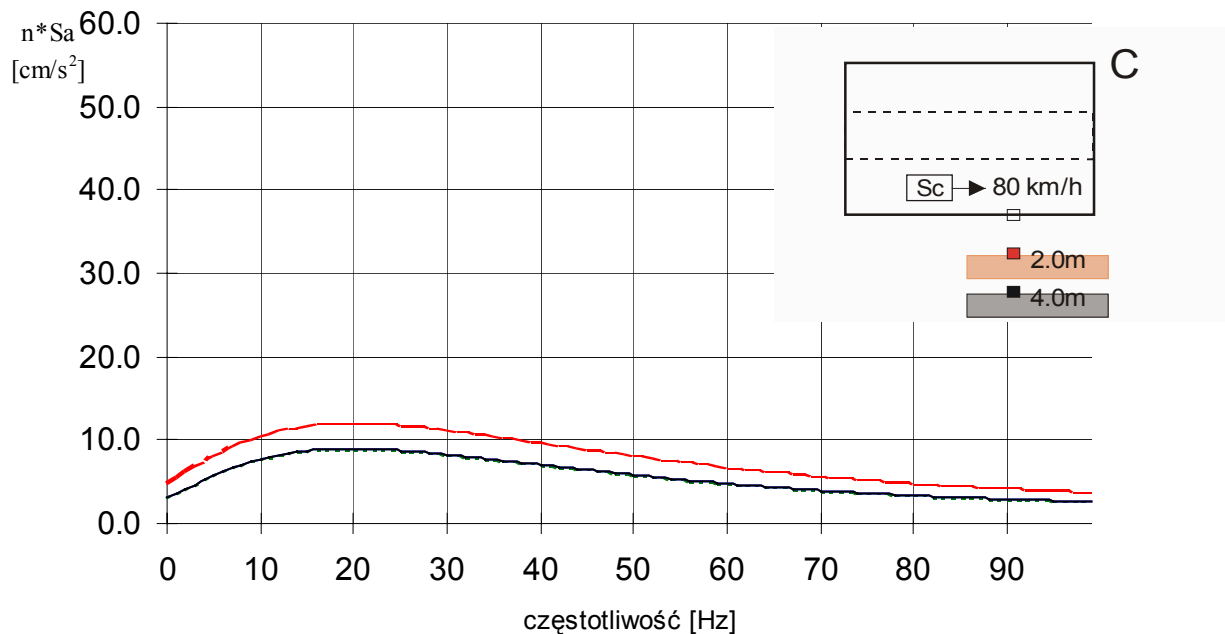
**Rys. 6.4.4** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w punkcie na budowlu, w odległości 2.0 m i 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B, przy przejeździe autobusu przegubowego po pasie 1 z prędkością 40 km/h.



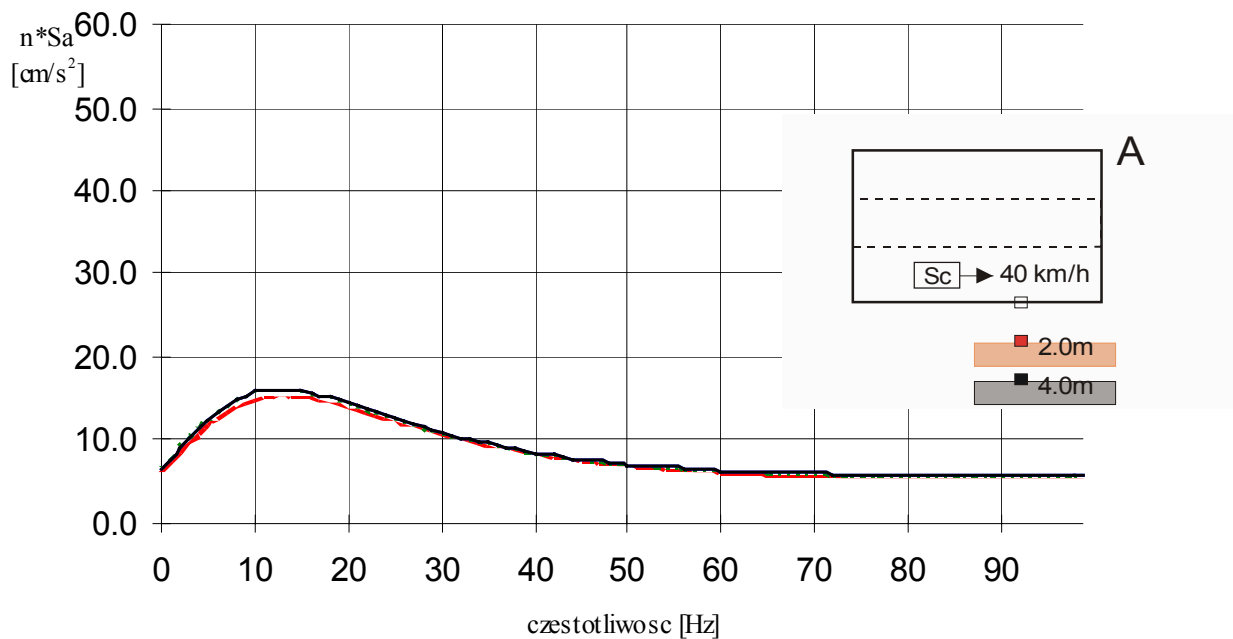
**Rys. 6.4.5** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w punkcie na budowlu, w odległości 2.0 m i 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B, przy równoczesnym przejeździe dwóch autobusów po pasie 1 i pasie 2 z prędkością 30 km/h.



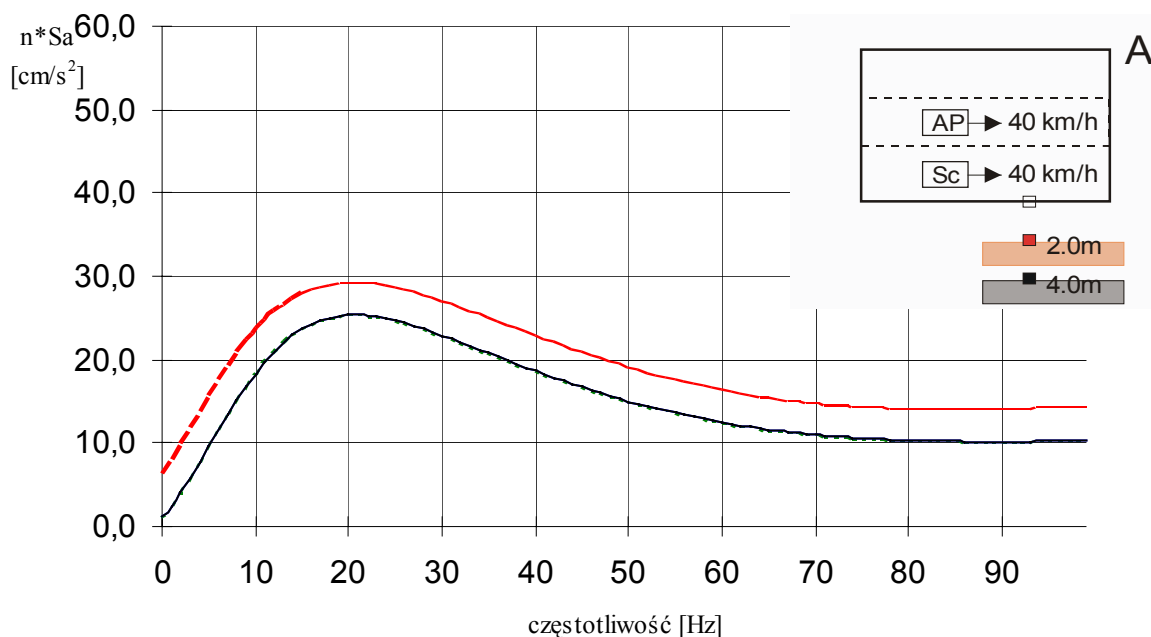
**Rys. 6.4.6** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w punkcie na budowlu, w odległości 2.0 m i 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju B, przy przejeździe samochodu ciężarowego z przyczepą (naczepą) po pasie 1 z prędkością 40 km/h przy równoczesnym przejeździe pasem 2 autobusu przegubowego z prędkością 40 km/h.



**Rys. 6.4.7** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w punkcie na budowlu, w odległości 2.0 m i 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju C, przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 1 z prędkością 80 km/h.



**Rys. 6.4.8** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w punkcie na budowlu, w odległości 2.0 m i 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju A, przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 1 z prędkością 40 km/h.



**Rys. 6.4.9** Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi wyznaczone w punkcie na budowlu, w odległości 2.0 m i 4.0 m od krawędzi jezdni w przekroju A, przy przejeździe samochodu ciężarowego po pasie 1 z prędkością 40 km/h przy równoczesnym przejeździe pasem 2 autobusu przegubowego z prędkością 40 km/h.

Kolejny rysunek dotyczy tego samego przekroju a przyspieszeniowe spektra odpowiedzi odpowiadają przejazdowi samochodu ciężarowego po pasie pierwszym z prędkością 40 km/h, przy jednoczesnym przejeździe pasem drugim autobusu przegubowego z tą samą prędkością (rys. 6.4.9). Zauważa się w tej sytuacji ruchowy wyraźny wpływ odległości budynku od jezdni na rzędne spektralne. Dotyczy to zarówno przekroju A, jak i przekroju C (rys.6.4.7) i obejmuje cały przedział częstotliwości. Przy przejeździe pojedynczego pojazdu stwierdza się przesunięcie maksymalnych wartości rzędnych linii spektralnych w kierunku niższych częstotliwości (por. rys. 6.4.8). Porównując wykresy zamieszczone na rys. 6.4.8 z podanymi na rys. 6.3.1 należy odnotować zmiany rzędnych spektrum w dziedzinie częstotliwości. Wzrosły rzędne przy niskich częstotliwościach (do 12 Hz) przy jednoczesnym znaczącym ich zmniejszeniu w przedziale wyższych częstotliwości. Nastąpiło więc zdecydowane przesunięcie dominujących wartości spektralnych w stronę niższych częstotliwości.

Usytuowanie budowli w analizowanych przekrojach w różnych odległościach od krawędzi drogi pokazuje, iż wpływ tych przekrojów na kształt spektrum odpowiedzi jest zauważalny. Na taki efekt składają się różne czynniki charakteryzujące przekroje. W informacji o przekroju (A, B, C) znalazły się wielkości charakteryzujące konstrukcje drogi, rodzaj podłoża, ale także właściwości budowli znajdującej się w tym przekroju. Budowle usytuowane w przekroju B i w przekroju C były różnie konstruowane. Zapewne inne też są ich właściwości dynamiczne. To wszystko wpływało na wyniki uzyskiwane za pomocą SSN nauczonej na danych uzyskanych w tych trzech przekrojach. Warto podkreślić, iż stosowano tu SSN do wyznaczenia przyspieszeniowych spektrum odpowiedzi na budowlu w przekroju A, chociaż w uczeniu SSN nie dysponowano informacjami pomiarowymi. Wyniki te stanowią prognozę za pomocą SSN odnoszącą się do hipotetycznej budowli i być może krzywe spektralne zamieszczone na rys. 6.4.8 obarczone są znacznie większym błędem wynikającym z zastosowanej tu ekstrapolacji (wyjściem poza przedział wartości objętych uczeniem).



## 7 Możliwości wykorzystania modelu zbudowanego za pomocą SSN w projektowaniu i diagnostyce budowli poddanych działaniu drgań komunikacyjnych

W poprzednich rozdziałach wykazano, iż można – korzystając z SSN – zbudować model umożliwiający wyznaczenie prognozowanego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych odpowiadający założonym warunkom ruchowo-drogowym. Model taki może być wykorzystywany zarówno w projektowaniu, jak i w diagnostyce budowli usytuowanych w pobliżu drogi.

Ogólne zasady postępowania w diagnostyce wpływu drgań parasejsmicznych (w tym również drogowych) na budowlę podano w [90]. Obliczanie składowych sił bezwładności działających na budowlę podczas jej drgań wywołanych ruchem podłoża można wykonać wg podanych tam (tzn. w [90]) zasad, jeśli znane będą parametry ruchu podłoża (fundamentu budowli). W przypadku drgań podłoża o charakterze regularnym można opisać je podając częstotliwość tych drgań oraz odpowiadającą jej amplitudę parametru ruchu (np. przyspieszenia). W pozostałych sytuacjach ruch podłoża może być scharakteryzowany za pomocą spektrum odpowiedzi.

Jeśli ruch podłoża pod budynkiem jest efektem przejazdu pojazdów po pobliskiej arterii komunikacyjnej to kształt spektrum odpowiedzi jest wynikiem określonej sytuacji ruchowo-drogowej.

Rzędne przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych uwzględniane w obliczeniach dotyczących budowli można wyznaczyć:

- na podstawie obliczenia dynamicznej reakcji oscylatora poddanego wymuszeniu kinematycznemu według pomierzonego podczas pomiarów dynamicznych ruchu podłoża (wibrogramu),
- korzystając z ogólnego modelu opisanego za pomocą SSN przy założeniu prognozowanych warunków ruchowo-drogowych.
- 

Z pierwszą z zestawionych wyżej sytuacji mamy do czynienia wówczas, gdy arteria komunikacyjna jest już eksploatowana a wyniki pomiarów zebrano podczas najniekorzystniejszych przejazdów pojazdów, po wcześniejszym przeprowadzeniu analizy ruchu pod kątem wyboru warunków przejazdu, będących źródłem największych drgań podłoża. W innym przypadku (arteria komunikacyjna w fazie projektowania, prowadzi się prace studialne odnośnie do lokalizacji drogi w pobliżu zabudowy i jej przyszłego wpływu na zabudowę wobec braku bezpośrednich informacji doświadczalnych o parametrach drgań podłoża można korzystać z modelu SSN wiążącego parametry ruchowo-drogowe z kształtem spektrum odpowiedzi. Wówczas to wystarczy przyjąć projektowane parametry ruchowo-drogowe i wprowadzić jako warstwę wejścia do SSN, aby w warstwie wyjścia otrzymać wartości potrzebne w obliczeniach składowych sił bezwładności działających na budowlę podczas jej drgań generowanych ruchem podłoża.

Model zbudowany za pomocą SSN może być również wykorzystywany w analizach wpływu zmiany prognozowanych parametrów ruchowo-drogowych na kształt i rzędne przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi, a tym samym na reakcję dynamiczną budowli. Analizy te przeprowadza się wówczas, jeśli za pomocą zmiany warunków ruchowych zamierza się doprowadzić do odpowiedniej redukcji drgań budowli generowanych przejazdem pojazdów.

Przy rozważaniu zadań związanych z diagnostyką i projektowaniem budowli mogą wystąpić następujące przypadki:

- a) budowla jest zrealizowana i arteria komunikacyjna jest eksploatowana,
- b) budowla jest projektowana w pobliżu eksploatowanej już arterii komunikacyjnej,
- c) w pobliżu zrealizowanej budowli projektuje się arterię komunikacyjną,
- d) tak budowla, jak i arteria komunikacyjna są w fazie projektowania.

Przypadek "a" jest typowym przypadkiem diagnostycznym. Informacje o kształcie i rzędnych przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi można otrzymać na podstawie odpowiednio zaplanowanych i zrealizowanych badań dynamicznych. Model zbudowany za pomocą SSN może tu posłużyć jedynie do oceny wpływu ewentualnej zmiany warunków ruchowo-drogowych na kształt i rzędne przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi i na tej podstawie można ocenić stopień redukcji drgań budowli po zastosowaniu odpowiednich zmian parametrów ruchowo-drogowych.

Wyniki uzyskane podczas pomiarów wykonanych w przypadku "a" można wprowadzić do modelu i w ten sposób poszerzyć zbiory danych o informacje objęte nowymi warunkami ruchowo-drogowymi (inna konstrukcja drogi, większe prędkości przejazdu pojazdów, nowe typy pojazdów, itp.). Tak "powiększony" model będzie można wykorzystać w szerszym obszarze zastosowań.

W przypadku "b" informacje o drganiach podłoża można uzyskać na podstawie bezpośrednich pomiarów zrealizowanych w sposób opisany wyżej. Natomiast obliczenie sił bezwładności działających na budowlę musi najpierw uwzględnić redukcję drgań na styku podłoża – fundament budowli. Do wyznaczenia stopnia tej redukcji może być wykorzystany model zbudowany za pomocą SSN. Tak otrzymane przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi może posłużyć do wyznaczenia składowych sił bezwładności działających na model projektowanej budowli. Jeśli wymagana będzie redukcja działań dynamicznych za pomocą odpowiedniej zmiany warunków ruchowo-drogowych, to wówczas można będzie wykorzystać model kształtowany przez SSN.

W sytuacjach "c" i "d" można również wykorzystać model zbudowany za pomocą SSN. W tych przypadkach nie dysponuje się wynikami bezpośrednich pomiarów drgań generowanych ruchem pojazdów, bowiem arteria komunikacyjna jest dopiero w fazie projektowania. Przyjęcie parametrów ruchowo-drogowych przewidzianych do wystąpienia w projektowanej drodze pozwoli na wyznaczenie prognozowanego przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych i zastosowanie tego spektrum w obliczeniach modelu budowli.

W każdej z rozważanych sytuacji model może być wykorzystany w analizach wpływu zmiany parametrów ruchowo-drogowych na redukcję drgań budowli. Można bowiem analizując zmiany wybranych parametrów ruchowo-drogowych wyznaczyć przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi i ocenić spodziewaną redukcję drgań budowli. W tablicy 7.1 zestawiono najważniejsze z możliwych do rozważenia środki techniczne stosowane w celu redukcji drgań drogowych na budowlę zlokalizowane w pobliżu arterii komunikacyjnych.

Możliwe są także inne działania (np. zastosowanie przegród w gruncie na drodze propagacji drgań od źródła do budowli, zmiana charakterystyki dynamicznej budowli), ale ich wpływ w opracowanym modelu nie mógł być jeszcze uwzględniony i dlatego nie zamieszczono ich w tablicy 7.1.

Tablica 7.1 Wykorzystanie środków technicznych do obniżenia poziomu drgań drogowych.

Środki techniczne możliwe do realizacji	Typ rozwiązania
Ograniczenie prędkości pojazdów	Działanie na źródło
Ograniczenie nośności pojazdów	
Całkowity zakaz ruchu pojazdów ciężkich	
Zmiana organizacji ruchu: - ograniczenie prędkości na pasach bliższych budowli - ograniczenie nośności pojazdów na pasach bliższych budowli - wyłączenie z ruchu pasów najbliższych budowli	
Remont drogi - usztywnienie podbudowy	
Wyłączenie drogi z użytkowania	
Oddalenie jezdni i budowli	Działanie na drogę propagacji
Wyłączenie budowli z eksploatacji	Działanie na odbiornik

W zakończeniu tego rozdziału należy podkreślić, iż opracowany model zbudowany na bazie SSN dobrze opisuje sytuacje, które mieszczą się “wewnątrz” zbioru informacji uzyskanych z pomiarów. Opis sytuacji wykraczających poza ten obszar i wymagających ekstrapolacji obarczony jest większym błędem. Na to zwracano uwagę w rozdz. 5 (przy kształtowaniu odpowiedniej SSN) i w rozdz. 6 (podczas analizy wpływu czynników spoza obszaru danych doświadczalnych na kształt spektrum odpowiedzi).

## 8 Wnioski

W niniejszej pracy udowodniono tezę, iż można zbudować model wiążący parametry ruchowo-drogowe z przyspieszeniowym spektrum odpowiedzi drgań drogowych. Do zbudowania takiego modelu z powodzeniem zastosowano tu sztuczną sieć neuronową (SSN). Spośród kilku analizowanych w pracy sztucznych sieci neuronowych wybrano jako umożliwiającą rozwiązanie postawionego tu zadania sieć #7. Jest to sieć ze wsteczną propagacją błędów z dynamicznie zmieniającym się członem momentum. Szczegółowy opis sieci podano w rozdz. 5.

Podczas uczenia i testowania SSN #7 wykorzystano stosunkowo obszerne wyniki badań doświadczalnych zebrane w czasie specjalnie zaprogramowanych i zrealizowanych pomiarów dynamicznych podczas eksperymentów czynnych i biernych.

Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi drgań drogowych uzyskane za pomocą modelu opracowanego w pracy są wygładzone. Zakładając możliwość wykorzystania modelu do wyznaczania prognozowanego, przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych odpowiednio do założonych parametrów ruchowo-drogowych, w końcowej wersji modelu wprowadzono taką modyfikację, aby otrzymane z obliczeń modelowych wygładzone wykresy spektralne stanowiły ograniczenie od góry krzywych uzyskiwanych na podstawie opracowania rzeczywistych wibrogramów. Taka modyfikacja modelu prowadzi do uzyskiwania wartości sił bezwładności obciążających budowlę podczas drgań po stronie bezpiecznej konstrukcji.

Model zbudowany w niniejszej pracy jest modelem otwartym. Można go rozbudowywać dołączając nowe informacje na wejściu (np. dotyczące innych konstrukcji drogi oraz innych specjalnych pojazdów a także rozszerzenia przedziału możliwych zmian prędkości przejazdu pojazdów). Te nowe dane pomiarowe będą równocześnie rozszerzać liczbę przypadków uczących i testujących.

Model zbudowany za pomocą SSN posłużył do przeprowadzenia stosunkowo obszernych analiz dotyczących wpływu wybranych parametrów ruchowo-drogowych na kształt i rzędne przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych. Wiele wniosków szczegółowych wynikających z takiej analizy przedstawiono w rozdziale 6 i tu już ich nie powtarza się. Niektóre jednak, ze względu na charakter uogólniający, zestawione zostały poniżej.

- ✓ Wpływ typu pojazdu na kształt i rzędne linii spektralnych jest wyraźnie zauważalny. Spośród różnych pojazdów ciężkich największe rzędne na wykresach spektralnych uzyskiwano przy przejeździe samochodów ciężarowych. Jako mniejszy ujawniał się w wykresach przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych wpływ przejazdu samochodów ciężarowych z naczepą (tzw. TIR), co wynika zapewne z ich lepszego uresorowania oraz stanu technicznego. Podobnie przejazdy autobusów przegubowych dawały większe rzędne w wykresach spektralnych niż przejazdy autobusów.
- ✓ Wpływ rozwiązania konstrukcyjnego drogi na rzędne przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych był wyraźnie zauważalny podczas prowadzonych analiz. Należy tu jednak podkreślić, iż w badanym modelu uwzględniono tylko trzy typy przekrojów (A, B, C). Można, rozszerzając zbiór danych pomiarowych o inne typy rozwiązań konstrukcyjnych uwzględnić również różne rodzaje nawierzchni (asfaltowa, betonowa, brukowa).
- ✓ Efekt dynamiczny jednoczesnego przejazdu kilku pojazdów po różnych pasach drogi nie jest bezpośrednim złożeniem efektów wywołanych pojedynczymi przejazdami pojazdów składowych. Nie obserwuje się efektu sumowania się drgań podczas jednoczesnego przejazdu pojazdów po pasach równoległych.
- ✓ Stwierdzono, że najczęściej w różnych rozważanych w analizach sytuacjach przejazdu

pojazdów wzrost prędkości przejazdu prowadzi do zwiększenia rzędnych krzywych spektralnych. Uzyskiwano jednak również wyniki, które nie były zgodne z podaną wyżej zasadą ogólną np. uzyskiwano przy niższych prędkościach wzrost rzędnych krzywych spektralnych to jednak dalszy wzrost prędkości przejazdu prowadził do zmniejszania się owych rzędnych. Niekiedy odstępstwa od podanej tu reguły dotyczyły tylko pewnych przedziałów zmian częstotliwości.

- ✓ Model przedstawiony w pracy dotyczy drgań podłoża poziomych, prostopadłych do osi jezdni. Podczas pomiarów rejestrowano również pozostałe składowe drgań (pozioma równoległa do pasów ruchu oraz pionowa). Okazało się jednak, że składowa pozioma ruchu podłoża prostopadła do pasów drogi ma największy wpływ na drgania budowli zlokalizowanych w pobliżu drogi. Składowa pozioma równoległa do osi drogi charakteryzuje się mniejszymi wartościami rzędnych, a składowa pionowa drgań ulega znacznej redukcji na styku podłoże-fundament budowli. Te spostrzeżenia zebrane podczas badań własnych są zgodne z podanymi w literaturze (por. np.[52]).
- ✓ Oddalanie się od krawędzi jezdni znacząco wpływa na zmniejszanie się rzędnych przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych.
- ✓ Krzywe uzyskiwane na fundamencie budowli charakteryzowały się wyraźnie mniejszymi rzędnymi niż krzywe odpowiadające tej samej odległości od krawędzi jezdni w punkcie na gruncie. Wynika to z redukcji drgań na styku podłoże-budowla. Nie analizowano wpływu charakterystyki dynamicznej budowli na kształt krzywych spektralnych bowiem wszystkie budynki, z których wyniki pomiarów wprowadzono do SSN należały do klasy budynków niskich.

W podsumowaniu rezultatów uzyskanych w niniejszej pracy należy również podkreślić, iż model budowano na podstawie wyników wielu pomiarów zarejestrowanych podczas przejazdu pojazdów po jezdni o dobrym stanie nawierzchni. Tym samym nie uwzględniono w modelu efektów znacznej degradacji nawierzchni. Można ten parametr uwzględnić wprowadzając w warstwie wejściowej dodatkowe neurony z tą charakterystyką związane i uzupełniając zbiory uczący i testujący o wyniki pomiarów zebrane podczas przejazdu pojazdów np. przez progi symulujące wystąpienie znacznej degradacji nawierzchni.

W zestawionych powyżej informacjach podano również pewne, wprowadzone w pracy, ograniczenia odnoszące się do uwzględnionych w modelu parametrach ruchowo-drogowych. Wprowadzenie tych ograniczeń wynikało jedynie z konieczności redukcji danych do poziomu rozsądnego, umożliwiającego udowodnienie postawionej na wstępie tezy naukowej. Dla SSN odpowiedniego modelu można teraz rozszerzać zbiór jego danych wejściowych tak, aby model ten był maksymalnie ogólny.

## 9 Proponowane kierunki dalszych badań

We wcześniejszych rozdziałach wykazano, że można za pomocą SSN kształtować model wiążący parametry ruchowo-drogowe z przyspieszeniowym spektrum odpowiedzi drgań drogowych. W modelu ukształtowanym w niniejszej pracy wykorzystano stosunkowo obszerny zbiór informacji zebranych podczas pomiarów dynamicznych przeprowadzonych jednak w sytuacji określonej programem badań. Chcąc uzyskać możliwie ogólny model należałoby ten zbiór informacji poszerzyć.

Model opisany w pracy jest modelem otwartym czyli takim, który może być poszerzany o nowe informacje uzyskiwane podczas kolejnych badań. Poszerzenie zbioru danych do uczenia i testowania SSN może iść w kierunku uwzględnienia w modelu nowych typów przekrojów drogi włącznie z uwzględnieniem wpływu degradacji nawierzchni na elekt dynamiczny wyrażony rzędnymi linii spektralnych.

Model zbudowano w pracy przy założeniu tłumienia wyrażonego ułamkiem tłumienia krytycznego o wartości 2%. W rozszerzeniu modelu można wprowadzić informacje o przyspieszeniowych spektrach odpowiedzi wyznaczonych z wibrogramów przy innych wartościach parametru tłumienia oraz w warstwie wejściowej SSN umieścić dodatkowy neuron z informacją o założonym tłumieniu. Umożliwi to wyznaczenie krzywych spektralnych uwzględnionych w obliczeniach różnych konstrukcji budowlanych.

Efekt redukcji drgań na styku podłoże-budowla zależy również od właściwości dynamicznych budowli. Ten wpływ nie mógł być w niniejszej pracy uwzględniony, gdyż wszystkie badania dotyczyły przekrojów drogi, w których usytuowane były budynki niskie. Rozszerzenie badań o przekroje, w których występują różne typy budynków i budowli umożliwiłoby uwzględnienie w kształtowanym modelu również wpływu tego czynnika.

Stałe poszerzanie zbioru informacji uzyskiwanych z pomiarów i to w różnych warunkach ruchowo-drogowych powinno doprowadzić do ukształtowania modelu umożliwiającego pełne jego wykorzystanie w projektowaniu i diagnostyce budowli zlokalizowanych w pobliżu arterii komunikacyjnych.

**Literatura**

- [1] Abratański A., Ciesielski R., Nasiński Z., Pieronek M., Ryncarz M.: Wyniki pomiarów drgań generowanych w kamieniołomie cementowni Małogoszcz z ostatnich lat. Materiały VII Sympozjum "Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle", s. 261-268, Kraków 1994.
- [2] Balmer S.: Signals and Systems. An Introduction. Prentice Hall 1996.
- [3] Bendat J., Piersol A.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych, PWN Warszawa 1976.
- [4] Chen H., Tsai K., Qi G., Yang J., Amini F.: Neural network for structure control, J. of Computing in Civil Engineering, vol. 9, No. 2, s. 168-176, 1995.
- [5] Cheng M., Popplewell N.: Neural network for earthquake selection in structural time history analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics vol. 23, s. 303-319, 1994.
- [6] Ciesielski R.: Spektrum główne w normach sejsmicznych; podstawy formowania i ich uzasadnienie. Materiały VIII Sympozjum "Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle", s. 55-64, Kraków 1997.
- [7] Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E.: Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w nich przebywających (diagnostyka dynamiczna), Wyd. ITB, Warszawa 1993.
- [8] Ciesielski R., Maciąg E.: Spektra odpowiedzi drgań wywołanych ruchem drogowym, Mechanika No.12, s. 27-46, Wyd. Krak. Oddział PAN, Kraków 1986.
- [9] Ciesielski R., Maciąg E., Tataro T., Pieronek M., Kowalski W., : Prace badawcze dotyczące działania wstrząsów górniczych z terenu kopalni Rudna na wybrane budynki mieszkalne w Polkowicach, Opracowanie IMB PK L-4/Z/74/89, Kraków 1989.
- [10] Ciesielski R., Maciąg E.: Drgania drogowe i ich wpływ na budynki, WKŁ, Warszawa 1990.
- [11] Ciesielski R., Maciąg E., Pieronek M.: Spektra odpowiedzi drgań wywołanych ruchem drogowym, Materiały XXVI Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, T.1, Teoria Konstrukcji, s.53-60, Wrocław-Krynica 1980
- [12] Ciesielski R., Stypuła K.: Badania doświadczalne wpływu drgań komunikacyjnych na budowle w śródmieściu Krakowa. Materiały VI Sympozjum "Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle", s. 205-221, Kraków 1991.
- [13] Ciesielski R., Stypuła K.: Symulacja nierówności nawierzchni drogowych przy badaniu efektów dynamicznych przejazdów; Materiały Seminarium Nauk.-Techn.: Problemy Transportu i Inżynierii Lądowej w Działalności Naukowej i Technicznej Krakowskiego Środowiska SITK; Zeszyt Nauk.-Techn. SITK nr 2 (Zeszyt 43), s. 91-106, Kraków 1996.
- [14] Ciesielski R., Kowalski W., Maciąg E., Tataro T.: Response spectra of mining shocks and their application for estimation of building reaction; 2<sup>nd</sup> International Conference on Traffic Effects on Structures and Environment. The Low Tatras, s. 265-269, 1991.
- [15] Ciesielski R., Kawecki J., Obciążenia sejsmiczne budowli w ujęciu normowym. Materiały IV Sympozjum "Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle", s. 21-33, Kraków 1985.
- [16] Ciesielski R., Kowalski W., Maciąg E., Tataro T.: Badania dynamiczne ścianowych budynków prefabrykowanych podlegających wpływom odstrzałów w kamieniołomie. Inżynieria i Budownictwo nr 9/95.
- [17] Ciesielski R., Kowalski W., Maciąg E., Tataro T.: Badania budynków prefabrykowanych podlegających odstrzałom w kamieniołomie. Materiały VII Sympozjum "Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle", s. 243-252, Kraków 1994.
- [18] Ciurej H., Kawecki J., Masłowski R.: Automatyzacja akwizycji danych pomiarowych i analizy wyników badań dynamicznych budowli; XXXIX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, T.3 Teoria Konstrukcji, s. 45-50, Krynica 1993.
- [19] Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu WKŁ. Warszawa 1997
- [20] Elkordy M., Chang K., Lee G.: A structural damage neural network monitoring system. Microcomputers in Civil Eng., 2, 7(1994), s.130-145.
- [21] Franks L.E.: Teoria sygnałów. PWN. Warszawa 1975.

- [22] Gagarin N., Flood I., Albrecht P.: Computing truck attributes with artificial neural networks; *J. of Transp. Eng.*, 2, 8 (1994), s.179-200.
- [23] Ghaboussi J. et al. Neural networks for structural control of a benchmark problem, active tendon system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 27, s. 1225-1245, 1998.
- [24] Ghaboussi J., Garrett J., Wu X.: Use of neural networks in detection of structural damage. *Comp.& Structures*, 42, s.649-659, 1992
- [25] Ghaboussi J., Joghataie A.: Active control of structures using neural networks. *J. of Engineering Mechanics*. Vol 121, No. 4, 1995.
- [26] Ghaboussi J., Lin C.C.: New method of generating spectrum compatible accelerograms using neural networks, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* vol 27, s. 377-396, 1998.
- [27] Hasiewicz Z.: Wavelet neural networks for density estimation. *Proceedings of the 3rd Conference "Neural Networks and Their Applications"*, s. 136-141, Częstochowa-Kule 1997.
- [28] Hayhurst C., Maguire J.: Draft Eurocode 8 – sample seismic force calculations for discussion purposes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* vol. 16, s.775-779, 1988.
- [29] He Y., Wu J.: Control of structural seismic response by self-recurrent neural network (SRNN). *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* vol 27, s.641-648, 1998.
- [30] Hertz J., Krough A., Palmer R.: *Wstęp do teorii obliczeń neuronowych*, WNT Warszawa 1995.
- [31] Housner G.W.: Calculation of the response of an oscillator to arbitrary ground motion, *Bull. Seism. Soc. of Am.* vol 31, s. 143-149, 1941.
- [32] Housner G.W.: *Strong Ground Motion and Design Spectrum [w]: Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, s. 75-106, New Jersey 1970.
- [33] Hunt H. E.: Modelling of traffic induced ground vibration by random process theory. *International Conference on Traffic Effects on Structures and Environment*. The Low Tatras, s. 361-366, 1987.
- [34] Hudson D.E.: *Ground motion measurements [w]: Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, s. 107-126, New Jersey 1970.
- [35] Ishikawa M.: Structural learning and rule discovery. *Proceedings of the 3rd Conference "Neural Networks and Their Applications"*, s. 17-29, Częstochowa-Kule 1997.
- [36] Instrukcja ITB nr 325. Cholewicki A., Perzyński J., Wadecki E.: *Projektowanie budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej podlegających wpływom wstrząsów górniczych*. ITB Warszawa 1993.
- [37] Instrukcja ITB nr 348. Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E.: *Diagnostyka dynamiczna i zabezpieczenia istniejących budynków mieszkalnych przed szkodliwym działaniem drgań na właściwości użytkowe budynków*. ITB Warszawa 1998
- [38] Kacprzak T., Słot K.: *Sieci neuronowe komórkowe*. PWN, Warszawa-Łódź 1996.
- [39] Kawecki J., Kogut J.P.: *Charakterystyki dynamiczne niskich budynków*, *Problemy naukowo-badawcze konstrukcji inżynierskich*, Monografia nr 194, s. 131-142, Politechnika Krakowska, Kraków 1995.
- [40] Kawecki J., Kogut J.P.: *Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do wyznaczania spektrum odpowiedzi drgań drogowych*, *Księga Jubileuszowa Prof. Zb.Kączkowskiego*, s. 215-222, OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.
- [41] Kawecki J., Kogut J.P.: *Badania charakterystycznych cech spektrów odpowiedzi drgań drogowych*, *Drogownictwo* Nr 12, s. 363-366, Warszawa 1996.
- [42] Kawecki J., Kogut J.P.: *Artificial neural networks in research of sensitivity of road vibration response spectra*, *Proceedings of the 3rd Conference "Neural Networks and Their Applications"*, s. 375-380, Częstochowa-Kule 1997.
- [43] Kawecki J., Kogut J.P.: *Weryfikacja metodyki wyznaczania modelowego spektrum odpowiedzi drgań drogowych*, *Materiały XLIII Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, T.3 - Teoria Konstrukcji*, s. 99-106, Poznań-Krynica 1997.



- [44] Kawecki J., Kogut J.P.: Badanie wpływu wybranych parametrów ruchu drogowego na kształt modelowego spektrum odpowiedzi, Materiały VIII Sympozjum "Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle", s. 157-162, Kraków 1997.
- [45] Kogut J.P.: The road vibrations spectrum sensitivity on some of the traffic parameters. Proceedings of the 4th Conference of Neural Networks and Their Applications s.338-343. Zakopane 1999.
- [46] Kogut J.P.: Backpropagation neural networks in modelling of road vibrations. Proceedings of the 14th Polish Conference on Computer Methods in Mechanics s. 157-158. Rzeszów 1999.
- [47] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D.: Sztuczne sieci neuronowe - podstawy i zastosowania, Wyd. PLJ Warszawa 1994.
- [48] Kowalski W.: Wyznaczanie sił sejsmicznych w budynkach podlegających wstrząsom górniczym. (Rozprawa doktorska) Politechnika Krakowska, Instytut Mechaniki Budowli. Kraków 1997.
- [49] Kwiatek J. (red.): Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych, Wydawnictwo Głównego Instytutu Górniczego, Katowice 1997
- [50] Leonard D, Grainer J., Eyre R.: Loads and vibrations caused by eight commercial vehicles with gross weights exceeding 32 tons (32.5 Mg), Transport and Road Research Laboratory, Laboratory Report 582, 1974.
- [51] Lipski Z.: Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi parasejsmicznego oddziaływania górniczego. Inżynieria i Budownictwo nr 4-5, s. 146-147, Warszawa 1990.
- [52] Maciąg E.: Zagrożenia obiektów zabytkowych przez wpływy parasejsmiczne, IV Konferencja Naukowo-Techniczna Inżynierskie problemy odnowy staromiejskich zespołów zabytkowych, s. 243-255, Kraków 1998.
- [53] Maciąg E.: Interakcja układu budynek - podłoże podlegającego działaniom sejsmicznym i parasejsmicznym (praca przeglądowa), Mech. Teoret. i Stosowana, T.17 (1979), z. 4, s. 497-536.
- [54] Maciąg E.: Wstrząsy górnicze i ich wpływ na budynki. Materiały VII Sympozjum "Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle", s. 34-48, Kraków 1994.
- [55] Masri S., Chassiakos A., Caughey T.: Identification of nonlinear dynamic systems using neural networks. J. of Applied Mechanics, vol. 60, s. 123-133, 1993.
- [56] Masters T.: Practical Neural Network Recipes in C++, Academic Press Inc. 1993.
- [57] Matlab. Users Manual. The Math Works Inc. Natick MA USA 1998.
- [58] Matsushita K. (red.): Design Essentials in Earthquake Resistant Buildings. Elsevier plc. 1970.
- [59] McCulloch W., Pitts W.: A logical calculus of ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics 5, s.115-133, 1943. [za] [30].
- [60] Moseholm L., Silva J., Larson T.: Forecasting carbon monoxide concentrations near a sheltered intersection using video traffic surveillance and neural networks, Transpn. Res. -D, vol. 1, No. 1, 1996, s. 15-28.
- [61] Mutke G.: Metoda prognozowania parametrów drgań podłoża generowanych wstrząsami górniczymi w obszarze GZW, (Praca doktorska), Główny Instytut Górniczego, Katowice 1991.
- [62] Newmark N., Rosenblueth E.: Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice Hall, Inc. NY 1981.
- [63] Nigam N.C., Jennings P.C.: Calculation of response spectra from strong-motion earthquake records, Bull. Seism. Soc. of Am. vol 59, No.2, s. 902-922, 1969.
- [64] Osowski S. : Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym, WNT Warszawa 1996.
- [65] Paez Th.: Neural networks in mechanical system simulation, identification and assessment, Shock and Vibration, No.2 vol 1, s.177-199. 1993
- [66] Pant P., Balakrishnan P.: Neural network for gap acceptance at stop-controlled intersections. J. of Transp. Eng., Proc. ASCE, 3, 120 (1994) s.432-446.
- [67] Pieronek M , Stypuła K.: Przykład badania drgań budowli zabytkowej wywołanych

- wpływami komunikacyjnymi. Materiały IV Sympozjum "Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle", s. 159-166, Kraków 1985.
- [68] Wantoch-Rekowski R.: Using RBF neural networks for wheeled vehicle classification on the base of ground vibration. Proceedings of the 4th Conference of Neural Networks and Their Applications, s.722-727. Zakopane 1999.
- [69] Rosenblatt F.: The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review* 65, s.386-408, 1958. [za] [56].
- [70] Spyrakos C.C.: *Finite Element Modeling in Engineering Practice*, APD, Pittsburg 1994.
- [71] Świątnicki Z., Wantoch-Rekowski R.: *Neural Networks. Introduction*. DW Bellona. Warszawa 1999.
- [72] Tadeusiewicz R.: *Sieci neuronowe*, Akad. OW RM Warszawa 1993.
- [73] Tracz M. (red.): *Pomiary i badania ruchu drogowego*. WKŁ. Warszawa 1984.
- [74] Tung A., Wong F., Dong W.: Prediction of the spatial distribution of the modified mercalli intensity using neural networks, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* vol. 23, s. 49-62, 1994.
- [75] Wasilewski A.: Application of artificial neural networks to dynamic weighting of trucks. Proceedings of the 3rd Conference "Neural Networks and Their Applications", s. 467-472, Częstochowa-Kule 1997.
- [76] Waszczyszyn Z.: Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w inżynierii lądowej, *Materiały Pokonferencyjne, XLI Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB*, t.9, s. 251-288, Krynica 1995.
- [77] Waszczyszyn Z.: Sztuczne sieci neuronowe w dynamice budowli, IX Sympozjum Dynamiki Budowli, *Mechanika z.48 t.1. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, Rzeszów-Jawor 1996.
- [78] Wiegel R.L.(co-editor) : *Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Inc. , New Jersey 1970.
- [79] Whiffin A., Leonard D.: A survey of traffic-induced vibrations, *Road Research Laboratory, Laboratory Report 418*, Crowthorne, Berkshire, 1971.
- [80] Zawadzki A.: Zastosowanie uproszczonej metody spektrum odpowiedzi do obliczania oddziaływań wstrząsów górniczych na budynki na przykładzie terenu Polkowic. (Rozprawa doktorska), ITB Warszawa 1986.
- [81] Żurada J., Barski M., Jędruch W.: *Sztuczne sieci neuronowe*, WN PWN Warszawa 1996.

### Normy i inne dokumenty

- [82] ACI 307/1995 Standard Practice for the Design and Construction of Reinforced Concrete Chimneys, 1995.
- [83] Model Code for Seismic Design of Concrete Structures. Final Draft, Bulletin d'Information CEB No. 160, Paris 1983.
- [84] CICIND. Model Code for Concrete Chimneys. 1984.
- [85] ČSN 73 0036 Seišmická zatižení staveb, Československa Statni Norma. Vydavatelstvi uradu pro normalizaci a mereni. Praha 1975.
- [86] DIN 4149 Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung ublicher Hochbauten, Normnausschuss Bauwesen (NAB) in DIN Deutsches Institut fur Normung e.V.
- [87] Eurocode 8. Structures in Seismic Regions - Design. Commission of the European Communities, Luxemburg 1989.
- [88] China Academy of Building Research, Building Aseismic Design Code (GBJ-11-89), China Construction Press, Beijing, 1989.
- [89] ISO-3010. Rev.N-18/1997. Seismic Action on Structures.
- [90] PN-85/B-02170. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki. PKNMiJ. Wyd. Normalizacyjne „Alfa”. Warszawa 1988

- [91] SNiP II-7-81 Stroitelstwo w sejsmiczeskich rajonach. Gos. Kom. SSSR po Dielam Stroitelstwa. Moskwa 1982
- [92] SN730036 - Seizmicke Zatazenie Stavebnych Konstrukcij. Bratislava 1995.
- [93] Uniform Building Code - Section 2314. Earthquake Regulations. California 1970.