

# INTERAKCJA DYNAMICZNA PODŁOŻE-BUDYNEK W PRZYPADKU PRZEKAZYWANIA PRĘDKOŚCI ORAZ PRZYŚPIESZEŃ DRGAŃ OD WSTRZĄSÓW POCHODZENIA GÓRNICZEGO

Krystyna KUŹNIAR<sup>a\*</sup>, Łukasz CHUDYBA<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instytut Techniki, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie, ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków

<sup>b</sup> Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

**Streszczenie:** W pracy dokonano porównania przekazywania poziomych składowych prędkości oraz przyśpieszeń drgań pochodzenia górniczego w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym z gruntu na fundament budynku mieszkalnego. W przypadku każdego ze wstrząsów oceniano wielkość redukcji maksymalnych wartości (amplitud) drgań fundamentu (zarejestrowanych w kierunkach równoległych odpowiednio do osi poprzecznej i podłużnej budynku) w stosunku do analogicznych amplitud jednocześnie zachodzących drgań gruntu. Wykorzystując wyniki badań doświadczalnych, do prognozowania przekazywania składowych prędkości oraz przyśpieszeń drgań z gruntu na fundament budynku zaproponowano zastosowanie sztucznych sieci neuronowych. Porównano dokładność aproksymacji neuronowej w przypadku sieci zaprojektowanych do użycia w odniesieniu do poziomych składowych prędkości oraz poziomych składowych przyśpieszeń drgań.

*Słowa kluczowe:* interakcja dynamiczna podłoże-budynek, przyśpieszenie drgań, prędkość drgań, sieci neuronowe.

## 1. Uwagi wstępne

Następstwem podziemnej eksploatacji górniczej są wstrząsy górotworu. W trakcie pękania skał wyzwala się bardzo duża ilość energii. Skutkiem wystąpienia takiego zjawiska dynamicznego w górotworze (gwałtownego odprężenia skał) jest emisja drgań, czyli sejsmiczny efekt wstrząsu. Do powierzchni propagują się fale wstrząsowe (sejsmiczne), które wzbudzają drgania budynków. Wstrząsy pochodzenia górniczego są trudne w badaniu, gdyż wzbudzone są niezależnie od woli człowieka i nie są przez niego kontrolowane – mają charakter losowy, tak jak trzęsienia ziemi. W jednym z najbardziej aktywnych sejsmicznie regionów górniczych w Polsce, Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM), intensywność najsilniejszych zjawisk sejsmicznych jest zbliżona do słabych trzęsień ziemi.

Podczas przekazywania drgań z gruntu na obiekt występuje zjawisko wzajemnego oddziaływania (współpracy) układu konstrukcja-podłoże, nazywane interakcją dynamiczną. Jest to zagadnienie bardzo ważne z praktycznego punktu widzenia. Jednocześnie występujące drgania gruntu obok budynku i drgania fundamentu budynku mogą się zasadniczo różnić zarówno w przypadku przyśpieszeń, jak i prędkości drgań

(Kuźniar, 2004; Kuźniar i in., 2006; Kuźniar i Maciąg, 2007). Dokładniejszej oceny szkodliwości drgań dla budynków dokonuje się na podstawie przebiegów drgań ich fundamentów (Maciąg, 2005). Szczególnie istotna jest tu zatem ocena sposobu przekazywania drgań na konstrukcję. W przypadku, gdy pomiarów drgań dokonuje się tylko na gruncie (co jest częstym przypadkiem w praktyce), potrzebne jest również prognozowanie drgań fundamentów budynków na podstawie drgań gruntu. Najprostszym i często stosowanym sposobem oceny przekazywania drgań z gruntu na fundament budynku jest porównanie maksymalnych wartości jednocześnie zarejestrowanych przyśpieszeń, prędkości lub przemieszczeń drgań fundamentu budynku i gruntu obok budynku (Ciesielski i Maciąg, 1990; Stypuła, 2001; Tatara, 2002).

Celem pracy było porównanie przekazywania poziomych składowych prędkości oraz przyśpieszeń drgań od wstrząsów górniczych w LGOM z gruntu na fundamenty budynku mieszkalnego o średniej wysokości. Oceniano wielkość redukcji tych drgań. I tak w przypadku każdego ze wstrząsów porównywano maksymalne wartości (amplitudy) składowych poziomych (w kierunkach równoległych do osi poprzecznej i podłużnej obiektu) drgań gruntu i fundamentu budynku

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: kkuźniar@up.krakow.pl

tak w zakresie przyspieszeń, jak i prędkości drgań. Wartości te pochodzą z rejestrowanych w tym samym czasie przebiegów drgań gruntu i fundamentu. Przy szacowaniu różnic w odpowiednich maksymalnych wartościach drgań gruntu i fundamentu budynku, pod uwagę wzięto wpływ wybranych parametrów wstrząsów górniczych i parametrów drgań podłoża gruntowego: energii wstrząsu, odległości epicentralnej, kierunku propagacji drgań (a więc wzajemnego położenia budynku i źródła wstrząsu górniczego), kierunku drgań budynku (równoległego do osi poprzecznej albo podłużnej), maksymalnej amplitudy drgań gruntu (prędkości, przyspieszeń) obok budynku oraz dominującej częstotliwości drgań gruntu.

Do prognozowania przekazywania drgań z gruntu na fundament budynku zaproponowano zastosowanie sztucznych sieci neuronowych. Porównano rezultaty uzyskane w przypadku sieci zaprojektowanych do użycia w odniesieniu do poziomych składowych prędkości oraz poziomych składowych przyspieszeń drgań. Wzorce uczące, walidujące oraz testujące sieci neuronowych utworzono wykorzystując wyniki badań doświadczalnych.

## 2. Analiza wyników badań doświadczalnych

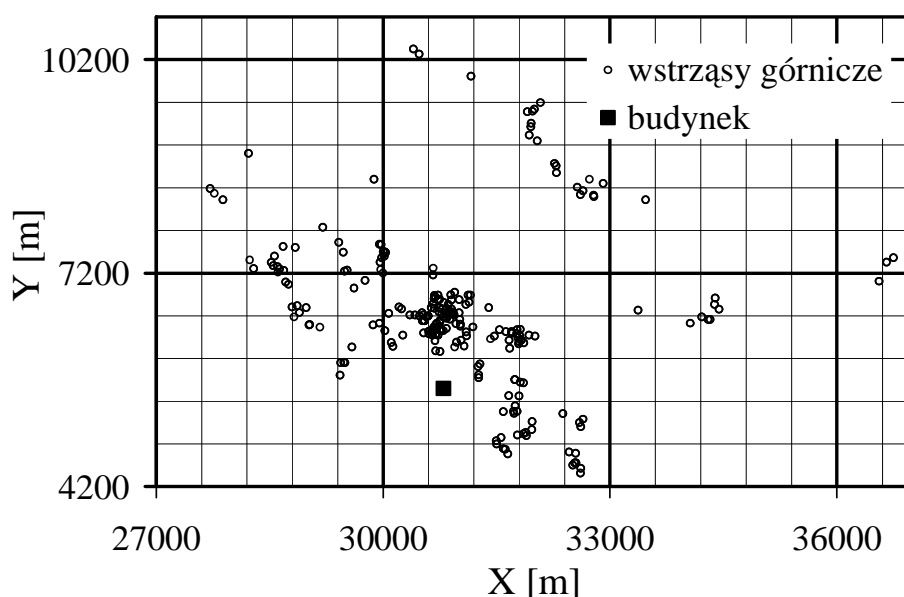
Analizy przekazywania drgań z podłoża na budynek dokonano wykorzystując wyniki badań doświadczalnych w skali naturalnej. Rozważono mieszkalny, ścianowy budynek o pięciu kondygnacjach i poprzeczno-podłużnym układzie ścian nośnych, w całości podpiwniczony, posadowiony na ławach fundamentowych. Może on być traktowany jako typowy obiekt, reprezentatywny dla szerokiej klasy budynków o średniej wysokości i zbliżonych właściwościach dynamicznych. Podłoże gruntowe stanowi warstwa gleby, poniżej glina piaszczysta, miejscami piasek średni i piasek drobny.

Z użyciem aparatury „czuwającej” rejestrowano drgania, których źródłem były wstrząsy górnicze w LGOM. Czujniki pomiarowe na gruncie umieszczone są w odległości kilku metrów od budynku. Czujniki w budynku ustawione są na fundamentach. Mierzono poziome składowe przyspieszenia drgań gruntu i budynku w kierunkach  $x$  i  $y$ , równoległych odpowiednio do osi poprzecznej i podłużnej budynku. Przebiegi prędkości drgań uzyskiwano poprzez całkowanie zarejestrowanych przebiegów przyspieszeń drgań.

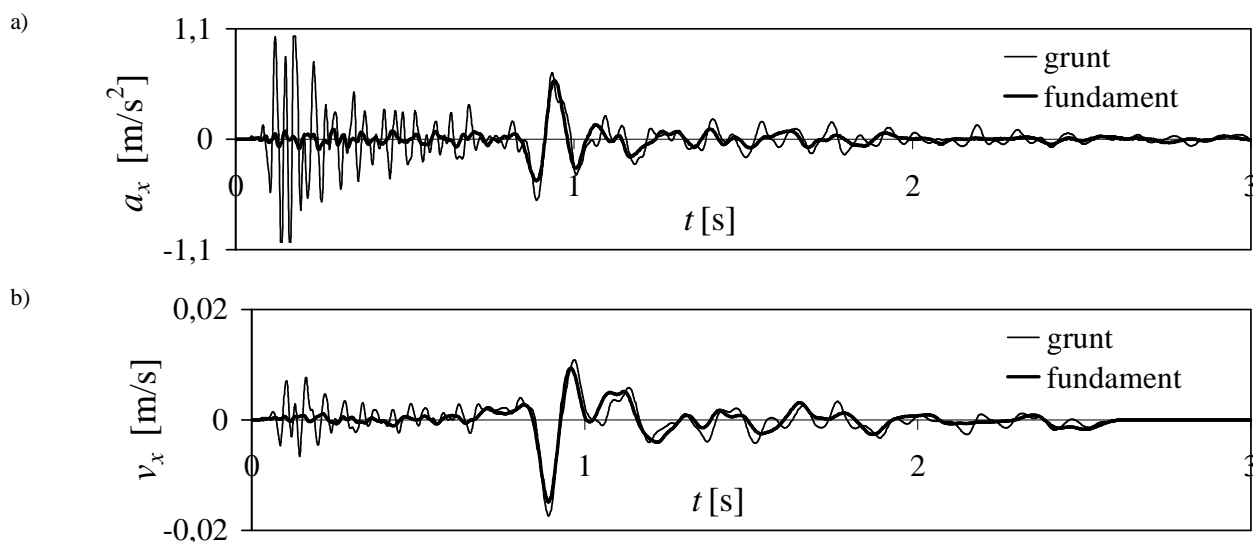
Pod uwagę wzięto przebiegi drgań zarejestrowane równocześnie na gruncie i w budynku, które były wynikiem wstrząsów górniczych o energiach z przedziału  $E_n = 7,4E3-2E9$  J i odległościach epicentralnych z przedziału  $r_e = 270-5815$  m. Zatem zakres energii i odległości epicentralnych tych wstrząsów jest bardzo szeroki. Z zamieszczonej na rysunku 1 schematycznej mapy lokalizacji analizowanych wstrząsów górniczych i rozważanego budynku, na której uwzględniono współrzędne sejsmologiczne ( $X$ ,  $Y$ ) w obowiązującym w LGOM lokalnym układzie odniesienia, widać że również zakres kierunków, z których do budynku docierają drgania jest bardzo szeroki.

Łącznie rozważono 928 składowych przebiegów przyspieszeń drgań (czyli 464 pary grunt-fundament) i taką samą liczbę składowych przebiegów prędkości drgań.

Stwierdzono, że różnice w drganiach gruntu i fundamentu odbywających się w tym samym czasie mogą być znaczące tak w zakresie składowych przyspieszeń, jak i składowych prędkości drgań. Na rysunku 2 pokazano przykładowe porównania przebiegów drgań gruntu i fundamentu rozważanego budynku odpowiednio w przypadku przyspieszeń  $a_x$  i prędkości drgań  $v_x$  w kierunku równoległym do osi poprzecznej budynku.



Rys. 1. Schematyczna mapa lokalizacji analizowanych wstrząsów górniczych i budynku



Rys. 2. Przebiegi drgań w kierunku  $x$  od wstrząsu górniczego o  $En = 1,2E7$  J i  $re = 698$  m: a) przyspieszenia; b) prędkości

Oceny przekazywania drgań z gruntu na fundament budynku dokonano poprzez porównanie maksymalnych wartości jednocześnie występujących drgań fundamentu i gruntu obok budynku. Maksymalne amplitudy na gruncie i na fundamencie nie zawsze pojawiają się w tym samym czasie z uwagi na to, że na styku grunt-fundament na ogół następuje modyfikacja przebiegu drgań.

Wyliczano zatem odpowiednie ułamki ( $r$ ) równe stosunkowi maksymalnej wartości drgań na fundamencie i maksymalnej wartości drgań na gruncie dla wszystkich analizowanych par grunt-fundament przebiegów przyspieszeń i prędkości drgań składowych. Przekazywanie drgań z gruntu na budynek rozważano osobno w kierunku  $x$ , osobno w kierunku  $y$  oraz łącznie w obu kierunkach  $x$  i  $y$  zarówno w przypadku przyspieszeń, jak i prędkości drgań.

I tak w przypadku analizy przekazywania przyspieszeń drgań składowych z gruntu na fundament budynku, obliczano ułamki:

– gdy rozważano tylko kierunek poprzeczny  $x$ :

$$r_{ax} = \frac{a_{xf \max}}{a_{xg \max}} \quad (1)$$

– gdy rozważano tylko kierunek podłużny  $y$ :

$$r_{ay} = \frac{a_{yf \max}}{a_{yg \max}} \quad (2)$$

gdzie:  $a_{xf \max}$  i  $a_{yf \max}$  są maksymalnymi przyspieszeniami drgań fundamentu odpowiednio w kierunku  $x$  oraz w kierunku  $y$ ,  $a_{xg \max}$  i  $a_{yg \max}$  są maksymalnymi przyspieszeniami drgań gruntu odpowiednio w kierunku  $x$  oraz w kierunku  $y$ , a  $r_{axy}$  jest wartością tych ułamków podczas łącznej analizy w zbiorze par grunt-budynek w obu kierunkach.

Analogiczne oznaczenia zaproponowano w przypadku analizy przekazywania prędkości drgań składowych z gruntu na fundament budynku:

– gdy rozważano tylko kierunek poprzeczny  $x$ :

$$r_{vx} = \frac{v_{xf \max}}{v_{xg \max}} \quad (3)$$

– gdy rozważano tylko kierunek podłużny  $y$ :

$$r_{vy} = \frac{v_{yf \max}}{v_{yg \max}} \quad (4)$$

gdzie:  $v_{xf \max}$  i  $v_{yf \max}$  są maksymalnymi prędkościami drgań fundamentu odpowiednio w kierunku  $x$  oraz w kierunku  $y$ ,  $v_{xg \max}$  i  $v_{yg \max}$  są maksymalnymi prędkościami drgań gruntu odpowiednio w kierunku  $x$  oraz w kierunku  $y$ , a  $r_{vxy}$  jest wartością tych ułamków podczas łącznej analizy w zbiorze par grunt-budynek w obu kierunkach.

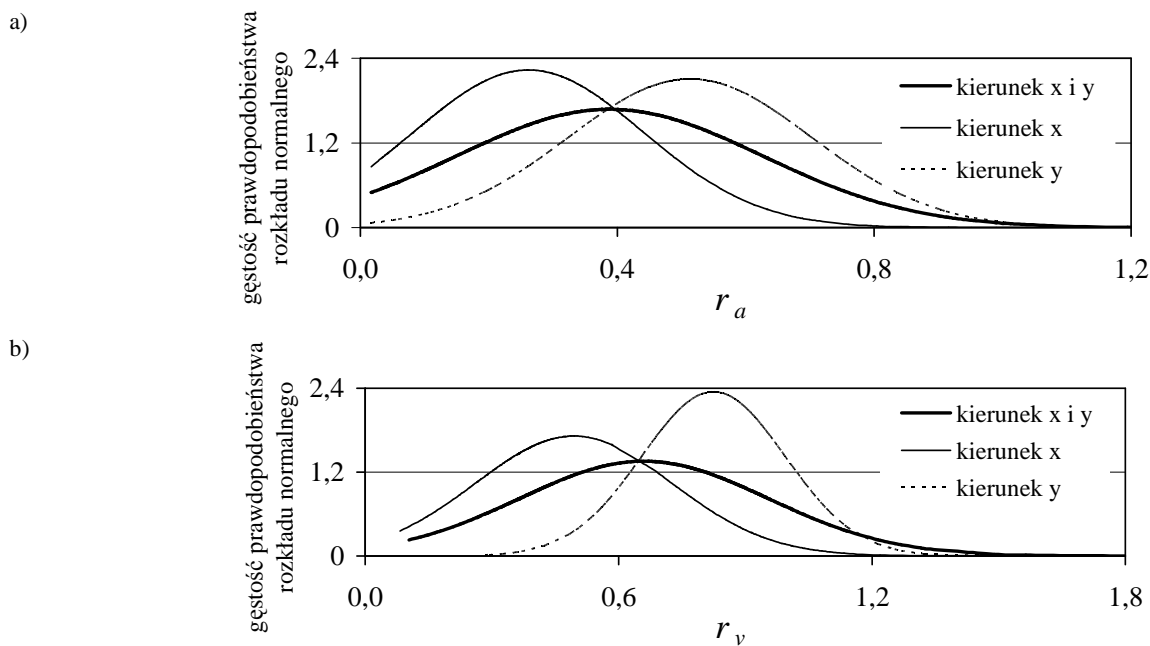
Na rysunku 3 pokazano gęstości prawdopodobieństwa rozkładu normalnego wartości ułamków  $r$  wyliczone osobno w kierunku  $x$ , osobno w kierunku  $y$  oraz łącznie w kierunku  $x$  i  $y$ , odpowiednio dla przyspieszeń (rys. 3a) i prędkości drgań (rys. 3b).

Z kolei na rysunku 4 porównano wartości ułamków  $r_a$  i  $r_v$  obliczone w przypadku wszystkich par grunt-budynek przebiegów drgań składowych od kolejnych analizowanych wstrząsów górniczych oraz odpowiednie linie trendu.

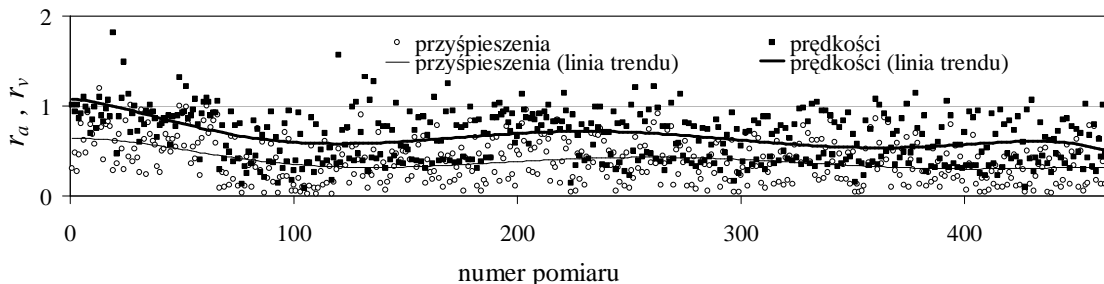
Widać, że przy przekazywaniu drgań z gruntu na budynek, redukcja maksymalnych wartości składowych prędkości drgań jest mniejsza niż redukcja maksymalnych wartości składowych przyspieszeń drgań dla tych samych wstrząsów górniczych.

W tabeli 1 porównano średnie wartości ułamków  $r_a$  i  $r_v$  wyliczone w przedziale energii wstrząsów do  $5E7$  J i powyżej tej wartości oraz w trzech przedziałach odległości epicentralnych.

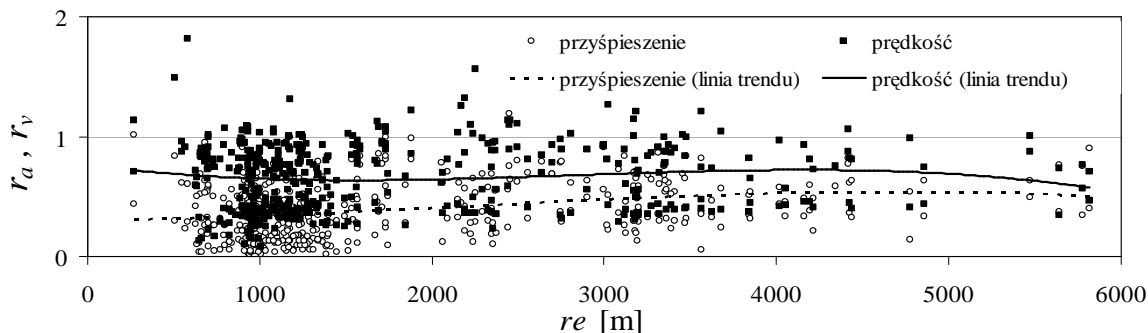
Dodatkowo, wyniki badań przekazywania składowych przyspieszeń i prędkości drgań z podłoża na fundament budynku ( $r_{axy}$  i  $r_{vxy}$ ) w zależności od odległości epicentralnych  $re$  w przypadku wszystkich analizowanych wstrząsów górniczych, łącznie dla obu kierunków drgań, wraz z liniami trendu pokazano na rysunku 5.



Rys. 3. Gęstość prawdopodobieństwa rozkładu normalnego wartości ułamków  $r$  w przypadku: a) przyspieszeń drgań; b) prędkości drgań



Rys. 4. Porównanie wartości ułamków  $r_a$  i  $r_v$  obliczonych dla tych samych wstrząsów górniczych



Rys. 5. Porównanie przekazywania składowych przyspieszeń i prędkości drgań z podłoża na budynek w zależności od odległości epicentralnych  $r_e$

Tab. 1. Zależność średnich wartości ułamków  $r_a$  i  $r_v$  od parametrów wstrząsów górniczych

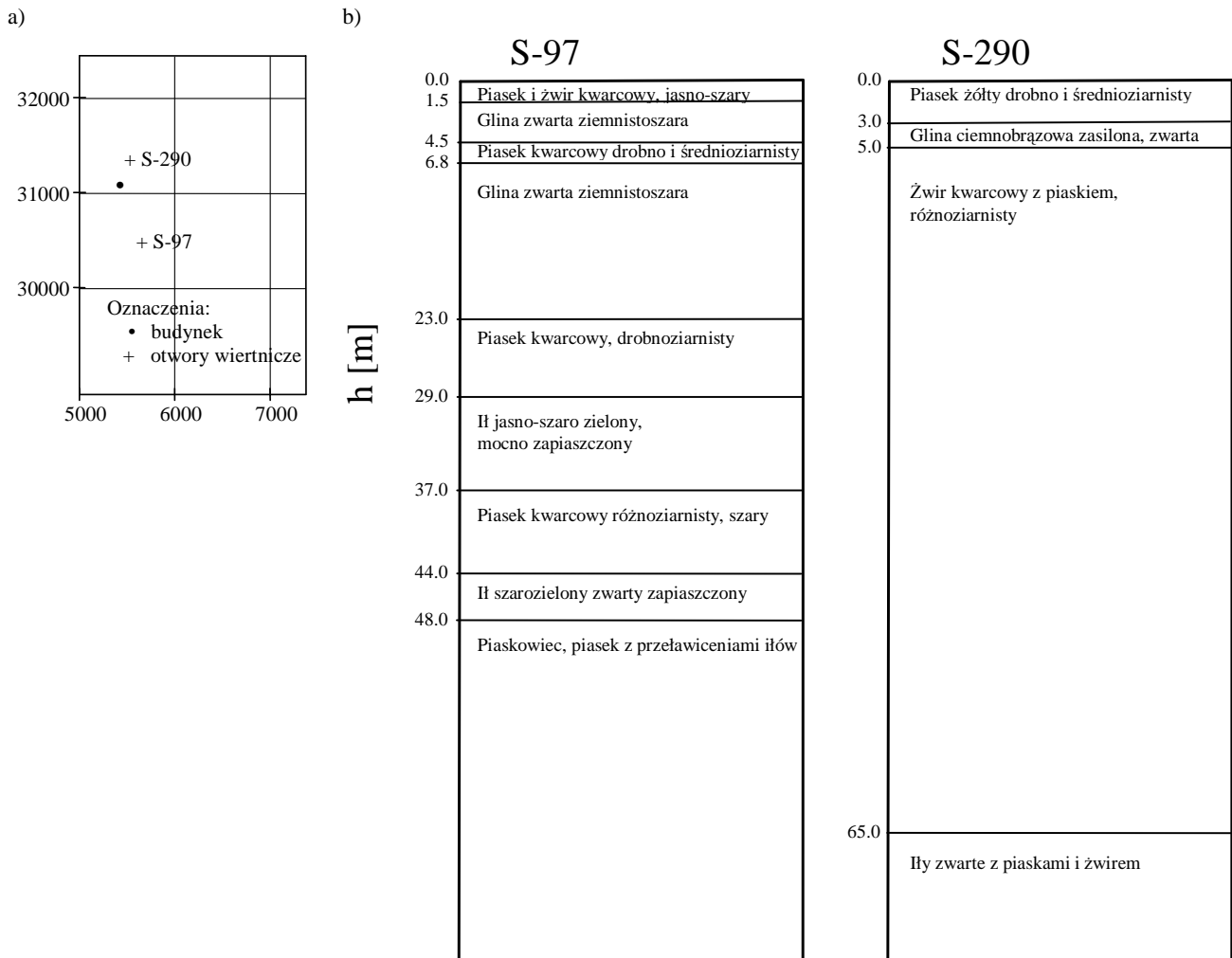
Parametry wstrząsów górniczych		Kierunek					
		x		y		x i y	
		$r_{ax}$	$r_{vx}$	$r_{ay}$	$r_{vy}$	$r_{axy}$	$r_{vxy}$
$En$ [J]	$\leq 5E7$	0,22	0,46	0,49	0,80	0,36	0,64
	$> 5E7$	0,44	0,62	0,65	0,91	0,54	0,76
$r_e$ [m]	$r_e \leq 800$	0,30	0,73	0,52	0,89	0,41	0,81
	$800 < r_e \leq 1500$	0,17	0,42	0,44	0,76	0,30	0,59
	$r_e > 1500$	0,37	0,54	0,61	0,88	0,49	0,71

Można zauważyć, że zarówno w przypadku przyspieszeń, jak i prędkości drgań w obu kierunkach drgań ich redukcja przy przekazywaniu z podłoża na budynek jest mniejsza w przypadku większych energii. Znacznie większa różnica w redukcji maksymalnych wartości składowych prędkości drgań i maksymalnych wartości składowych przyspieszeń drgań występuje jednak w przypadku małych energii wstrząsów – ułamki  $r_v$  są około dwa razy większe od odpowiednich ułamków  $r_a$  w kierunku  $x$ , w kierunku  $y$ , oraz przy łącznej analizie kierunków  $x$  i  $y$ .

Z wyników badań przedstawionych w tabeli 1 i na rysunku 5 widać, że przekazywanie składowych przyspieszenia i składowych prędkości drgań gruntu na fundament budynku jest stosunkowo dobre przy dużych odległościach epicentralnych wstrząsów. Natomiast w małych odległościach epicentralnych stwierdza się znacznie lepsze przekazywanie prędkości drgań z gruntu na fundament niż przekazywanie przyspieszeń drgań (linie trendu z rysunku 5 wyraźnie się „rozchodzą”).

Rozważając wpływ wzajemnego położenia epicentrum wstrząsu górniczego i budynku na przekazywanie drgań z podłoża na obiekt, pośrednio analizuje się wpływ rodzaju podłoża na propagację fali. Na terenie LGOM występuje znaczne zróżnicowanie budowy geologicznej, zwłaszcza warstwy przypowierzchniowej (Olszewska, 2008). Na rysunku 6 przykładowo pokazano położenie budynku i najbliższych otworów wiertniczych S-97 i S-290 oraz profile geologiczne tych otworów.

W zależności od lokalnych warunków geologicznych, drgania powierzchniowe wzbudzone wstrząsami górniczymi mogą propagować się z różną intensywnością w poszczególnych kierunkach. Różny może być więc charakter drgań gruntu obok budynku i dalej różny sposób przekazywania tych drgań na budynek. Mimo takiej samej bezwzględnej odległości ogniska wstrząsu mogą wystąpić różnice w sposobie przekazywania drgań (Kuźniar i Chudyba, 2010).



Rys. 6. Analizowany budynek i otwory wiertnicze S-97 i S-290: a) wzajemne położenie budynku i otworów wiertniczych, b) profile geologiczne otworów wiertniczych

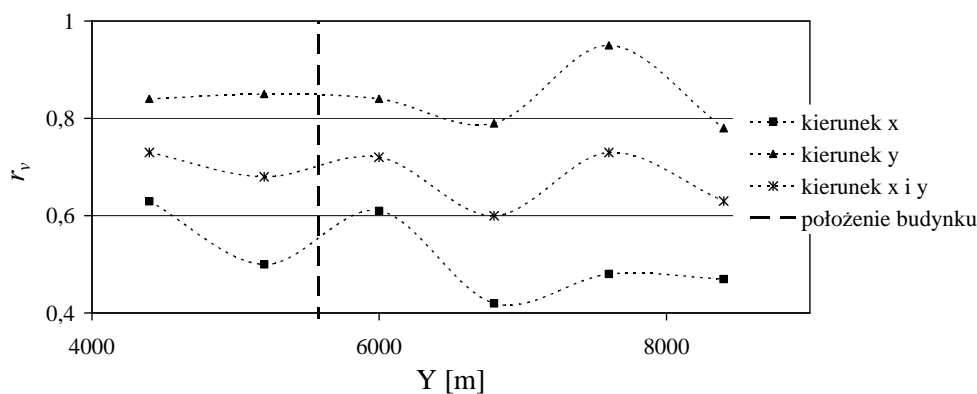
Istotny wpływ kierunku propagacji drgań (wzajemnego położenia budynku i miejsca wstrząsu górniczego) przykładowo pokazują wyniki analiz przedstawione w tabeli 2, w której zamieszczono średnie wartości wszystkich ułamków  $r$  wyliczane w odpowiednich „pasmach” współrzędnej sejsmologicznej  $X$  o takiej samej szerokości, przyjmowanych po „obu stronach” budynku. Podobne spostrzeżenia dotyczą rysunku 7, na którym pokazano przykładowo graficzną ilustrację zależności średnich wartości tych ułamków od współrzędnej  $Y$  w przypadku przekazywania prędkości drgań z gruntu na fundament budynku. Punkty odpowiadające wyliczonym średnim wartościom ułamków z każdej grupy

współrzędnych połączono w celu wyraźniejszego pokazania występujących relacji. Zatem kierunek propagacji fali od epicentrum wstrząsu do budynku ma wyraźny wpływ na sposób przekazywania drgań z gruntu na fundament budynku zarówno w przypadku składowych przyspieszeń, jak i prędkości drgań.

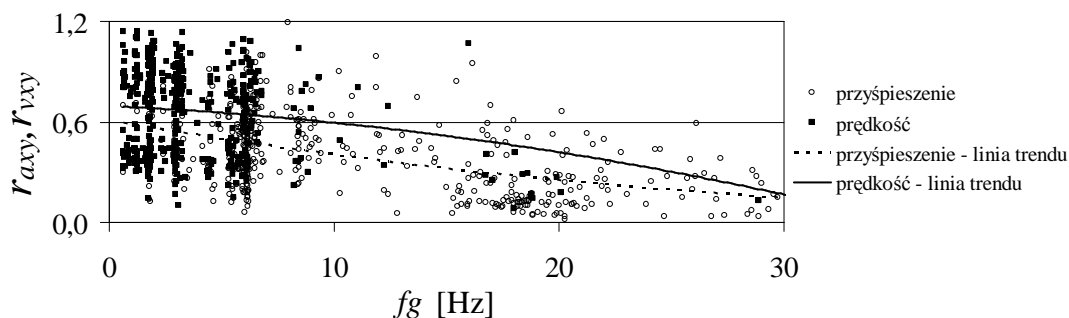
Z wyników badań doświadczalnych w skali naturalnej widać również wpływ dominujących częstotliwości drgań gruntu na przekazywanie drgań z podłoża na fundament budynku. Na rysunku 8 porównano zależności ułamków  $r_{axy}$  i  $r_{vxy}$  od dominujących częstotliwości  $fg$  odpowiednio przyspieszeń i prędkości składowych drgań gruntu (łącznie w kierunku  $x$  i w kierunku  $y$ ).

Tab. 2. Zależność średnich wartości ułamków  $r$  od współrzędnej sejsmologicznej  $X$  wstrząsów górnicznych

X [m]	Drgania składowe					
	kierunek $x$		kierunek $y$		kierunek $x$ i $y$	
	$r_{ax}$	$r_{vx}$	$r_{ay}$	$r_{vy}$	$r_{axy}$	$r_{vxy}$
do 28399	0,39	0,54	0,64	0,80	0,51	0,67
28400 - 29199	0,41	0,56	0,63	0,97	0,53	0,78
29200 - 29999	0,35	0,60	0,60	0,87	0,48	0,74
30000 - 30799	0,17	0,42	0,44	0,81	0,31	0,62
	Budynek					
30800 - 31599	0,21	0,51	0,43	0,79	0,32	0,64
31600 - 32399	0,25	0,49	0,52	0,81	0,39	0,65
32400 - 33199	0,41	0,57	0,62	0,79	0,51	0,67
powyżej 33200	0,41	0,46	0,69	0,85	0,55	0,65



Rys. 7. Zależność ułamków  $r$  od współrzędnej sejsmologicznej  $Y$  w przypadku składowych prędkości drgań



Rys. 8. Zależność ułamków  $r_{axy}$  i  $r_{vxy}$  od dominujących częstotliwości  $fg$  drgań gruntu

Zarówno w przypadku przyspieszeń, jak i prędkości drgań składowych, na fundament budynku przekazywają się składowe drgań z bardzo niskimi dominującymi częstotliwościami. Natomiast składowe z wyższymi częstotliwościami ulegają wyraźnemu wy tłumieniu.

Na rysunku 9 przykładowo pokazano zależność ułamka  $r_a$  od maksymalnych wartości (amplitud) składowych przyspieszeń drgań gruntu  $a_{g \max}$ . Można stwierdzić, że trudno jest określić jednoznacznie wpływ wielkości amplitudy drgań gruntu (dotyczy to zarówno przyspieszeń, jak i prędkości drgań składowych) na stopień redukcji drgań przy ich przekazywaniu na fundament budynku. Linie trendu wskazują na lepsze przekazywanie drgań z większymi wartościami amplitud drgań gruntu.

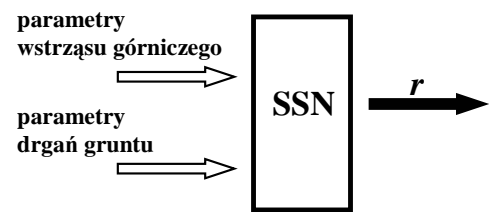
Analiza wyników badań eksperymentalnych prowadzi do wniosku, że występują znaczące różnice w przekazywaniu drgań gruntu na fundament budynku (przyspieszeń i prędkości) w kierunku poprzecznym  $x$  i podłużnym  $y$ . Mniejszą wartość ułamka  $r$  wyznaczano w kierunku poprzecznym  $x$  praktycznie w przypadku niemal wszystkich pomiarów, bez względu na wartości poszczególnych parametrów wstrząsów ( $En$ ,  $re$ ,  $X$ ,  $Y$ ) i drgań gruntu ( $a_{g \max}$ ,  $v_{g \max}$ ,  $fg$ ).

Również praktycznie w przypadku wszystkich analizowanych wstrząsów górniczych, redukcja maksymalnych wartości prędkości drgań składowych jest mniejsza niż redukcja maksymalnych wartości przyspieszeń drgań przy przekazywaniu drgań z gruntu na budynek.

### 3. Wykorzystanie sieci neuronowych do analizy przekazywania drgań z podłoża na budynek

Wyniki badań doświadczalnych posłużyły jako wzorce do uczenia, walidacji i testowania sztucznych sieci neuronowych (SSN), które mogłyby posłużyć do prognozowania wartości ułamków  $r$  w przypadku przekazywania składowych przyspieszeń oraz prędkości drgań z gruntu na fundament budynku. Ogólną strukturę wszystkich proponowanych sieci pokazano na rysunku 10.

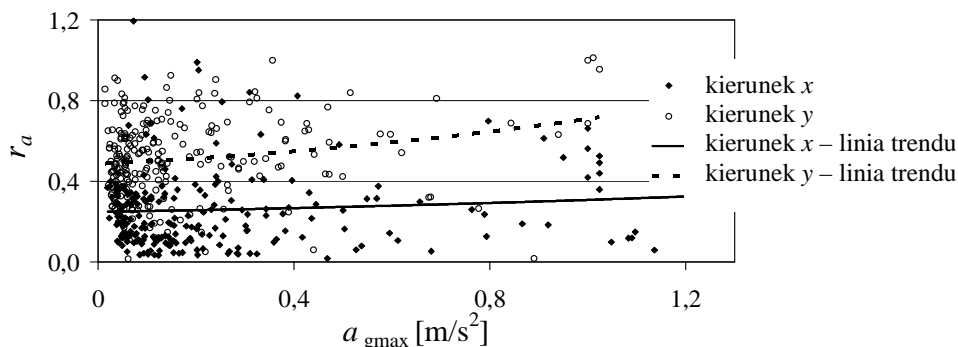
Konstruowano sieci neuronowe oddzielnie dla przypadku przekazywania składowych przyspieszeń drgań i oddzielnie w odniesieniu do prędkości drgań składowych



Rys. 10. Ogólna struktura sieci neuronowej do prognozowania wartości ułamka  $r$

z analogicznymi wektorami wejścia i wyjścia sieci. Pod uwagę wzięto różne kombinacje parametrów wejściowych sieci i różną ich liczbę. Analizowano dokładność aproksymacji neuronowej przyjmując różne warianty wektorów wejścia i wektorów wyjścia sieci. Energię wstrząsu  $En$ , jako podstawowy parametr opisujący wstrząs górniczy, uwzględniano we wszystkich rozważanych wektorach wejścia. Pod uwagę wzięto również: odległość epicentralną  $re$ ,  $a_{g \max}$  albo  $v_{g \max}$  – maksymalną wartość (amplitudę) składowych drgań gruntu w przypadku odpowiednio w przypadku sieci neuronowej dla przyspieszeń i prędkości drgań,  $k$  – parametr opisujący kierunek drgań (w celu zróżnicowania kierunków, arbitralnie przyjęto  $k = 0,4$  i  $k = 0,7$  odpowiednio dla kierunku poprzecznego  $x$  oraz kierunku podłużnego  $y$ ),  $X$  i  $Y$  – współrzędne sejsmologiczne w lokalnym układzie odniesienia,  $fg$  – dominującą częstotliwość przyspieszeń albo prędkości drgań gruntu. Na wyjściu z sieci oczekiwano odpowiednio ułamka  $r_a$  gdy rozważano przekazywanie składowych przyspieszeń drgań z gruntu na budynek oraz ułamka  $r_v$  w przypadku przekazywania prędkości drgań. Dodatkowo proponowano też sieci do analizy tylko jednego kierunku drgań składowych (równoległego do osi poprzecznej albo podłużnej budynku). W sumie rozważono 36 kombinacji wektor wejścia – wektor wyjścia (17 dla przyspieszeń i 19 dla prędkości drgań).

Zastosowano sztuczne sieci neuronowe typu wstecznej propagacji błędów (WPB) z algorytmem uczenia Levenberga-Marquardta (LM) (Bishop, 2006; Haykin, 1999; Osowski, 2006) i sigmoidalną unipolarną (logistyczną) funkcją aktywacji. Użyto programu Matlab NN Toolbox (Demuth i in., 2005). Dokładność aproksymacji neuronowej oceniano za pomocą błędów średniokwadratowego  $MSE$  (*Mean Square Error*) oraz



Rys. 9. Zależność ułamka  $r_a$  od maksymalnych wartości (amplitud) składowych przyspieszeń drgań gruntu  $a_{g \max}$

błędów względnych  $ep$ . Wykorzystywano również tak zwany procent sukcesu  $SR$  (*Success Ratio*) [%] w funkcji błędu względnego  $ep$  [%], który podaje jaki procent wzorców uzyskano z predykcji neuronowej z błędem nie większym niż  $ep$ .

Z danych doświadczalnych, zarówno w przypadku przyspieszeń, jak i prędkości drgań składowych, do analizy neuronowej wzięto po  $P = 464$  wzorców dla każdego z wariantów par wektor wejścia-wektor wyjścia. Losowo wybrane 50% z tych wzorców przeznaczano do uczenia sieci. Zbiory walidujące i testujące utworzono z pozostałych wzorców: 25% – zbiór walidujący oraz 25% – zbiór testujący. Projektowano sieci neuronowe z jedną warstwą ukrytą, a kryterium doboru liczby neuronów w tej warstwie był możliwie najmniejszy błąd  $MSE$  uczenia, walidacji i testowania.

Jak można było się spodziewać, uwzględnienie w wektorze wejścia sieci tylko trzech podstawowych parametrów opisujących wstrząs górniczy i drgania gruntu, a więc energii wstrząsu  $En$ , odległości epicentralnej  $re$  i maksymalnej wartości (amplitudy) drgań gruntu (odpowiednio  $a_{g\max}$  w przypadku przyspieszeń i  $v_{g\max}$  w przypadku prędkości drgań) prowadzi do uzyskania najmniejszych wartości  $SR$ . Wzbogacenie informacji wejściowej sieci o parametr  $k$  opisujący kierunek drgań, ewentualnie o  $fg$  – dominującą częstotliwość drgań gruntu wyraźnie zwiększa dokładność obliczeń. Jednak nieco bliższe wartościom oczekiwany ułamek  $r$  są wyniki neuronowej prognozy z użyciem sieci z parametrem  $k$  w wektorze wejścia sieci. Natomiast podanie w wektorze wejścia sieci zarówno informacji o dominującej częstotliwości drgań gruntu jak i informacji o kierunku drgań, pozwala na zwiększenie wartości  $SR$  nawet o ponad 20%. Z kolei podanie w informacji wejściowej sieci neuronowej współrzędnych sejsmologicznych (X, Y) wstrząsu górniczego zamiast odległości epicentralnej  $re$ , może istotnie wpłynąć na zwiększenie dokładności neuronowej prognozy przekazywania drgań z gruntu na fundament budynku. Różnice w wartościach  $SR$  obliczanych dla kolejnych błędów  $ep$  sięgają nawet kilkunastu procent. Jednak uwzględnienie w wektorze wejścia zarówno odległości epicentralnej, jak i współrzędnych sejsmologicznych nie zmienia znacząco uzyskanych rezultatów. Stwierdzono również, że nieco mniejsze błędy aproksymacji wykazują sieci do prognozowania redukcji maksymalnej prędkości drgań podczas przekazywania z gruntu na fundament. Zatem sposób przekazywania prędkości drgań składowych jest „lepiej przewidywalny” niż ma to miejsce w przypadku składowych przyspieszeń drgań.

#### 4. Uwagi końcowe

Analizując wyniki pomiarów drgań wywołanych wstrząsami górniczymi w zakresie redukcji maksymalnych amplitud przyspieszeń oraz prędkości poziomych drgań składowych przy ich przekazywaniu z gruntu na fundament budynku o średniej wysokości, stwierdza się duży „rozrzut” wartości ułamków  $r$  oraz istotne różnice

w przekazywaniu składowych przyspieszeń i prędkości drgań. Można zauważyć, że wielkość tej redukcji jest funkcją wielu zmiennych: energii wstrząsu, odległości epicentralnej, kierunku propagacji fali, wielkości maksymalnej amplitudy drgań gruntu, kierunku drgań (równoległego do osi poprzecznej lub podłużnej budynku), czy dominującej częstotliwości drgań gruntu obok budynku. Niemniej jednak określenie jednoznacznych zależności ułamków  $r$  od tych parametrów nie jest możliwe. Trudno jest też precyzyjnie podać jak duży wpływ na przekazywanie drgań z podłoża na fundament budynku może mieć uwzględnienie każdego z tych parametrów, czyli określić jak istotny jest ich udział w wielkości redukcji maksymalnej amplitudy drgań fundamentu budynku w stosunku do maksymalnej amplitudy drgań gruntu wzbudzanych wstrząsami górniczymi. Wydaje się, że proponowane sieci neuronowe mogą być pomocne w analizie tego zagadnienia.

#### Literatura

- Bishop C. M. (2006). Pattern recognition and machine learning. Springer, New York.
- Ciesielski R., Maciąg E. (1990). Drgania drogowe i ich wpływ na budynki. WKŁ, Warszawa.
- Demuth H., Beale M., Hogan M. (2005). Neural Network Toolbox for use with Matlab 5, User's Guide.
- Haykin S. (1999). Neural networks – a Comprehensive Foundation, 2nd Edition. Prentice Hall Intern. Inc., Upper Saddle River, New York.
- Kuźniar K. (2004). Analiza Drgań Budynków Ścianowych o Średniej Wysokości Podlegających Wstrząsom Górniczym z Wykorzystaniem Sieci Neuronowych. Monografia 310, seria: Inżynieria Łądowa, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- Kuźniar K., Chudyba Ł. (2010). Analiza wpływu kierunku propagacji drgań od wstrząsów górniczych na ich przekazywanie z gruntu na budynek. W: *Materiały 56 Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”*, Krynica 2010, 185-192.
- Kuźniar K., Maciąg E. (2007). Wpływ parametrów wstrząsów górniczych na interakcję dynamiczną grunt-budynek. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, nr 243, z. 45, 113-123.
- Kuźniar K., Maciąg E., Tataro T. (2006). Acceleration response spectra from mining tremors. W: *Proc. of the 1<sup>st</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES)*, Geneva 2006, Switzerland, Abstract Book, 466-467 (full paper on CD).
- Maciąg E. (2005). Ocena szkodliwości wstrząsów górniczych dla budynków na podstawie drgań ich fundamentów czy gruntu? *Inżynieria i Budownictwo*, 12/2005, 670-677.
- Olszewska D. (2008). Ocena efektów lokalnych i struktury częstotliwościowej sygnałów sejsmometrycznych dla poprawy dokładności prognozy rozprzestrzeniania drgań wzbudzanych wstrząsami górniczymi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym. Rozprawa doktorska, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, AGH, Kraków.
- Osowski S. (2006). Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.



- Stypuła K. (2001). Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkiego i ich wpływ na budynki. *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej*, seria Inż. Łąd., 72, Kraków.
- Tatara T. (2002). Działanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górniczymi na niską tradycyjną zabudowę mieszkalną. *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej*, seria Inż. Łąd., 74, Kraków.

#### **SOIL-STRUCTURE INTERACTION IN CASE OF THE TRANSMISSION OF MINE-INDUCED VELOCITIES AND ACCELERATIONS OF VIBRATIONS**

**Abstract:** Problem of the transmission of mine-induced in Legnica-Glogow Copperfield region ground vibrations to building foundation is analysed in the paper. The maximal values of horizontal vibration components of velocities as well

as accelerations are taken into account. The influence of some mining tremors and ground vibrations parameters on the vibrations reduction was discussed. Taking into account the difficulties in the soil-structure interaction analysis in the case of vibrations induced by mining tremors, the application of neural networks for the prediction of building foundation vibrations on the basis of ground vibrations taken from measurements is proposed in the paper. Experimental data obtained from the measurements of ground and actual structure vibrations were applied as the neural network training, validating and testing patterns. The obtained results lead to a conclusion that the neural technique gives results accurate enough for engineering practice in case of component velocities as well as component accelerations, but the neural prognosis of velocities transmission are a little better.