

Łukasz CHUDYBA*

Politechnika Krakowska

WYKORZYSTANIE SSN W ANALIZIE PRZEKAZYWANIA SIĘ DRGAŃ WZBUDZANYCH WSTRZĄSAMI GÓRNICZYMI Z GRUNTU NA BUDYNEK

Streszczenie. Praca dotyczy analizy przekazywania się drgań podłoża gruntowego, spowodowanych wstrząsami górniczymi, na budynek o średniej wysokości. Wykorzystano jeden z parametrów używanych w Górnictwej Skali Intensywności (GSI-2004) do oceny skutków oddziaływania drgań na obiekty powierzchniowe – maksymalną amplitudę wypadkowego przyspieszenia drgań poziomych. Porównywano wyniki jednoczesnych pomiarów drgań podłoża gruntowego i fundamentów badanego obiektu. Analizowano wpływ różnych parametrów wstrząsów i drgań. Wyniki badań doświadczalnych wykorzystano w próbie oceny dynamicznej interakcji podłoże-budynek z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN).

APPLICATION OF ANNs IN THE ANALYSIS OF MINE-INDUCED VIBRATIONS TRANSMISSION FROM SOIL TO BUILDING

Summary. The paper deals with the analysis of the transmission of ground vibrations induced by mining tremors to basement of medium-height building. The one of parameters used in scales of mine-induced dynamic influences (GSI-2004) to evaluate the harmfulness of ground vibrations to surface structures – maximal values (amplitudes) of resultant acceleration of horizontal vibrations were applied. Results of the same time vibrations measurements on the ground and on the foundation level were compared. The influence of mining tremors parameters was discussed. The experimental data were used in the soil-structure interaction evaluation with the application of artificial neural networks (ANNs).

1. Wstęp

Wstrząsy górotworu powstałe wskutek prac prowadzonych podczas wydobywania rudy miedzi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM) są źródłem

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Krystyna Kuźniar, prof. Akademii Pedagogicznej w Krakowie.

drgań powierzchniowych, które w sposób negatywny oddziałują na budowle. Wstrząsy te, tak samo jak w przypadku ruchu podłoża gruntowego wywołanego trzęsieniem ziemi, mają charakter losowy. Nie wiadomo, kiedy mogą wystąpić. W LGOM podczas silnych wstrząsów i niewielkich odległości epicentralnych przyspieszenia poziomych drgań gruntu mogą dochodzić nawet do 25% wartości przyspieszenia ziemskiego [1].

Wyniki jednoczesnych pomiarów drgań gruntu obok obiektów i fundamentów budynków, wywołanych wstrząsami górnictwymi, pokazują znaczące różnice między nimi [1, 2, 3]. Różnice te spowodowane są interakcją dynamiczną, a więc zjawiskiem wzajemnego oddziaływania układu budynek-grunt. Zjawisko to ma bardzo istotne znaczenie z praktycznego, inżynierskiego punktu widzenia. Istotną sprawą jest zarówno prognozowanie wpływu drgań, jak również ocena sposobu przekazywania drgań z podłoża na konstrukcję. Dokładniejszą ocenę szkodliwości drgań dla budynków uzyskuje się na podstawie drgań ich fundamentów [4]. Stąd, gdy dysponuje się tylko przebiegami drgań gruntu (w praktyce często taki przypadek występuje), potrzebna jest na ich podstawie prognoza drgań fundamentów.

W pracy przedstawiono wyniki badań przekazywania tego typu drgań z gruntu na pięciokondygnacyjny budynek mieszkalny. W tym celu porównywano maksymalne wypadkowe poziome przyspieszenia drgań gruntu i fundamentu budynku, pomierzone w tym samym czasie. Wypadkowa przyspieszeń drgań poziomych gruntu jest jednym z parametrów używanych w Górnictwej Skali Intensywności (GSI-2004) do oceny oddziaływań drgań na obiekty powierzchniowe [5]. Podobne zagadnienie rozważano w pracy [1], ale analizę prowadzono osobno dla składowych drgań poziomych równoległych do osi podłużnej i poprzecznej budynku. Celem niniejszej pracy nie jest dyskusja nad przydatnością rejestrowanych przebiegów przyspieszeń drgań wzbudzonych wstrząsami górnictwymi do analizy interakcji dynamicznej podłoże-budynek. Wybór tego rodzaju przebiegów drgań wynika z powszechności ich wykorzystywania, m.in. również w niedawno powstałej skali GSI-2004 [5].

Do prognozowania przekazywania drgań z gruntu na fundament budynku zaproponowano wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych (SSN).

2. Wyniki badań doświadczalnych

Analizowane przebiegi przyspieszeń drgań pochodzą od wstrząsów górnictwowych w LGOM, z okresu kilku lat [1, 2, 3]. Pomiarów dokonano za pomocą aparatury „czuwającej”. Czujniki umieszczono na fundamencie budynku mieszkalnego,

prefabrykowanego, o pięciu kondygnacjach i poprzeczno-podłużnym układzie ścian nośnych oraz na gruncie w odległości kilku metrów od badanego budynku. Mierzono jednocześnie przyspieszenia drgań gruntu i fundamentu w kierunkach równoległych odpowiednio do poprzecznej (x) i podłużnej (y) osi budynku od wielu wstrząsów górniczych [1, 2, 3].

Na podstawie pomierzonych składowych przebiegów przyspieszeń drgań w kierunkach x i y , dla każdego wstrząsu wyliczono maksymalne wartości wypadkowego przyspieszenia drgań poziomych PGA i PFA (odpowiednio na gruncie i na fundamencie budynku):

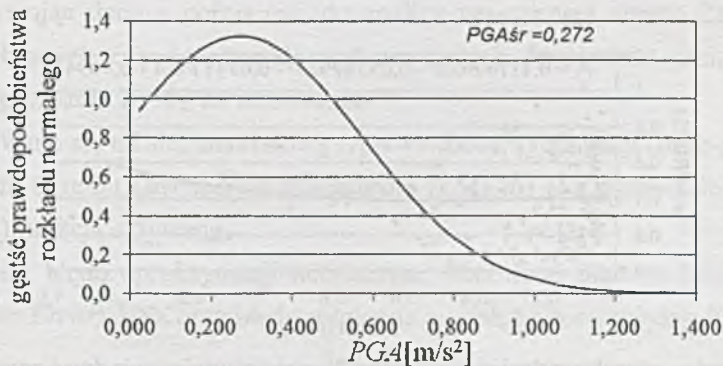
$$PGA = \max_t \left(\sqrt{a_{gx}^2(t) + a_{gy}^2(t)} \right) \quad (1a)$$

$$PFA = \max_t \left(\sqrt{a_{fx}^2(t) + a_{fy}^2(t)} \right) \quad (1b)$$

gdzie: $a_{gx}(t), a_{gy}(t)$ oraz $a_{fx}(t), a_{fy}(t)$ – odpowiednio przyspieszenia drgań na gruncie oraz fundamencie w kierunkach x i y w kolejnych chwilach czasu.

Oceny przekazywania drgań z gruntu na fundament dokonano przez porównanie maksymalnych amplitud wypadkowych przyspieszeń drgań jednocześnie zarejestrowanych na fundamencie budynku i gruncie obok budynku. W tym celu wyliczano stosunek $r_w = PFA / PGA$.

Na rys. 1 pokazano gęstość prawdopodobieństwa rozkładu normalnego maksymalnych amplitud wypadkowych przyspieszeń drgań gruntu PGA rozważanych wstrząsów oraz podano wartość średnią.



Rys. 1. Gęstość prawdopodobieństwa rozkładu normalnego PGA

Fig. 1. Normal probability density distribution of PGA

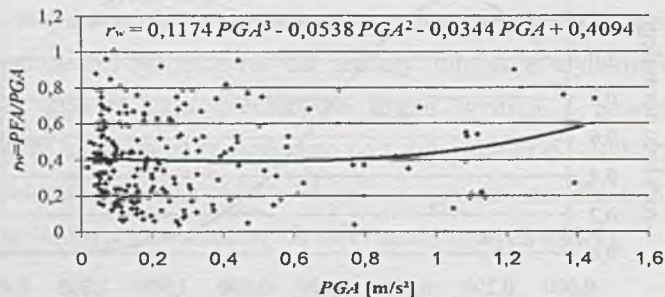
W wierszu 1 tabeli 1 zamieszczono średnie wartości r_w w zależności od maksymalnego wypadkowego przyspieszenia na gruncie PGA .

Tabela 1

Zależność wartości średniej $r_w = PFA/PGA$ od parametrów wstrząsów i drgań

Lp.	Parametry wstrząsów i drgań	$r_w = PFA/PGA$	
1	PGA [m/s^2]	≤ 300	0,40
		0,301 – 0,600	0,43
		0,601 – 0,900	0,39
		$> 0,900$	0,47
2	En [J]	$\leq 5E7$	0,37
		$> 5E7$	0,59
3	r_e [m]	$r_e \leq 800$	0,41
		$800 < r_e \leq 1500$	0,30
		$r_e > 1500$	0,56

Rysunek 2 przedstawia zależność ułamka r_w od maksymalnej amplitudy drgań wypadkowych w przypadku wszystkich badanych wstrząsów górniczych wraz z linią trendu (kryterium wyboru linii był największy współczynnik korelacji liniowej). Trudno jest jednoznacznie określić zależność r_w od PGA . Można zauważyć, że średnio w przypadku analizowanego budynku redukcja maksymalnego wypadkowego przyspieszenia drgań fundamentu budynku w stosunku do drgań gruntu jest najmniejsza dla PGA z przedziału 0,301÷0,600 [m/s^2] i PGA większego od 0,900 [m/s^2]. Kształt linii trendu (rys. 2) w zasadzie odzwierciedla tendencje w wartościach średnich. Zależności te są analogiczne do otrzymanych z analiz przebiegów drgań w kierunkach x i y w [1].



Rys. 2. Zależność r_w od maksymalnej wartości wypadkowego przyspieszenia drgań gruntu PGA
 Fig. 2. Ratio r_w versus maximal values of resultant acceleration of ground vibrations PGA

Podobne trudności jak w określeniu dokładnej zależności redukcji drgań od PGA (przy przekazywaniu ich z gruntu na budynek) napotkano też w przypadku dwóch innych istotnych parametrów wstrząsów górniczych, a mianowicie energii wstrząsu En i odległości epicentralnej r_e . Stwierdzono jednak (por. np. tablica 1), że redukcja drgań

na fundamencie jest wyraźnie mniejsza w przypadku dużych energii wstrząsów górniczych oraz dużych odległości epicentralnych.

Można zauważyć, że analiza wyników badań doświadczalnych niesie ze sobą duże trudności w ocenie przekazywania drgań z gruntu na budynek o średniej wysokości. Można tylko doszukać się pewnych zależności ułamka r_w od parametrów drgań i wstrząsów. Nie jest możliwe jednoznaczne jego określenie.

3. Analiza przekazywania się drgań z podłoża na budynek z wykorzystaniem sieci neuronowej

Wykorzystując wyniki badań doświadczalnych, podjęto próbę zastosowania sztucznych sieci neuronowych (SSN) do przewidywania sposobu przekazywania się drgań od wstrząsów górniczych z gruntu na fundament pięciokondygnacyjnego budynku mieszkalnego.

W wektorze wejścia sieci przyjęto trzy najistotniejsze parametry niezbędne do oceny przekazywania się drgań z gruntu na budynek:

$$\mathbf{x}_{(3 \times 1)} = \{PGA, En, r_e\} \quad (2)$$

gdzie: PGA – maksymalna wartość (amplituda) wypadkowej drgań poziomych gruntu; En – energia wstrząsu górniczego; r_e – odległość epicentralna.

W wektorze wyjścia oczekiwano ułamka $r_w = PFA / PGA$:

$$\mathbf{y}_{(1 \times 1)} = \{r_w\} \quad (3)$$

Wykorzystując dane z pomiarów, do analizy neuronowej wzięto 226 wzorców. Losowo wybranych $L = 113$ zostało wykorzystanych do uczenia sieci, $V = 56$ do walidacji, a pozostałe $T = 57$ do testowania.

Zdecydowano się na sieć neuronową typu wstecznej propagacji (back-propagation) z algorytmem uczenia *Levenberga-Marquardta* (LM) [6, 7] i sigmoidalną unipolarną (logistyczną) funkcją aktywacji.

Jako miarę błędu aproksymacji neuronowej stosowano błąd średniokwadratowy (*Mean Square Error*) MSE oraz błędy względne ep i błędy bezwzględne Ep :

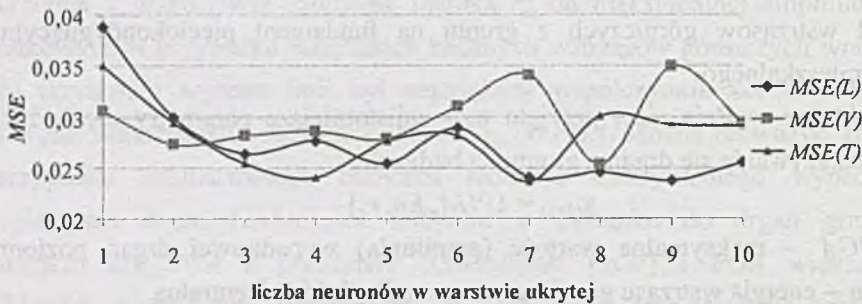
$$MSE(Q) = \frac{1}{Q} \sum_{p=1}^V (y_p - \hat{y}_p)^2, \quad (4)$$

$$ep = \left| 1 - \hat{y}_p / y_p \right| \cdot 100\%, \quad (5)$$

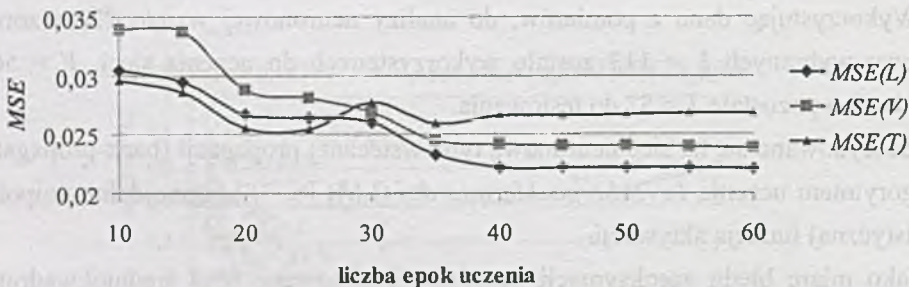
$$Ep = y_p - \hat{y}_p \quad (6)$$

gdzie: $Q = L, V, T$ – liczba wzorców w zbiorach uczącym (L), walidującym (V) i testującym (T); y_p i \hat{y}_p – wartość stosunku r_w wyznaczona na podstawie zarejestrowanych przebiegów drgań oraz wyliczona neuronowo dla p -tego wzorca.

Kryterium doboru struktury sieci neuronowej był możliwie najmniejszy błąd MSE dla uczenia, walidacji i testowania. Analizowano sieci z jedną warstwą ukrytą. Rysunek 3 przedstawia wykres zależności błędów MSE od liczby neuronów w warstwie ukrytej przy 40 epokach uczenia, natomiast na rys. 4 pokazano zmiany błędów MSE w zależności od liczby epok uczenia dla sieci o 3 neuronach w warstwie ukrytej. Po przeanalizowaniu wielu sieci zdecydowano się na sieć o architekturze 3-3-1, uczoną przez 40 epok. Przy jej użyciu dostaje się następujące błędy: $MSE(L) = 0,0222$; $MSE(V) = 0,0241$; $MSE(T) = 0,0266$.



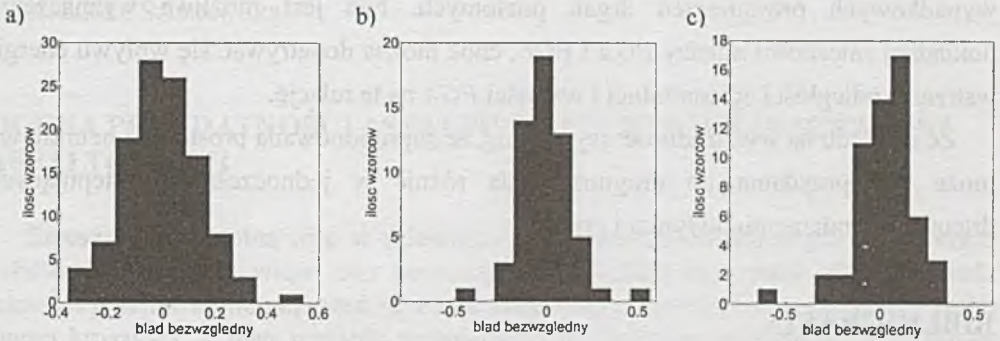
Rys. 3. Zależność błędu MSE od liczby neuronów w warstwie ukrytej sieci neuronowej
Fig. 3. MSE vs. the number of neurons in the neural network hidden layer



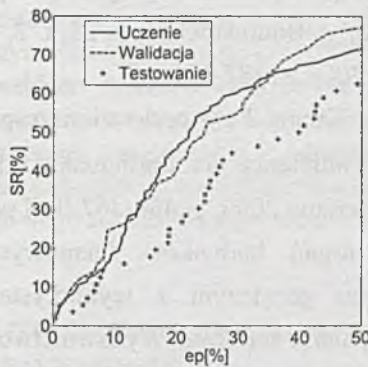
Rys. 4. Zależność błędu MSE od ilości epok uczenia dla sieci o 3 neuronach w warstwie ukrytej
Fig. 4. MSE vs. the number of learning epochs for the network with 3 neurons in the hidden layer

Rysunek 5 przedstawia histogramy błędów bezwzględnych Ep dla uczenia (a), walidacji (b) i testowania (c) wykorzystanej sieci neuronowej. Do oceny dokładności przeprowadzonych obliczeń wykorzystano również tzw. procent sukcesu (*Success Ratio*) $SR[\%]$ w zależności od błędu względnego $ep[\%]$. Na rys. 6 przedstawiono procent sukcesu SR neuronowej prognozy przekazywania się drgań na fundament

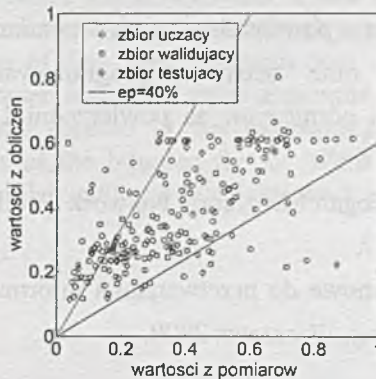
z wykorzystaniem zaproponowanej sieci neuronowej. Rysunek 7 porównuje wartości ułamka r_w wyliczone na podstawie pomiarów i obliczone za pomocą tej sieci. Zaznaczono granicę błędu względnego $ep = 40\%$.



Rys. 5. Histogramy błędu bezwzględnego Ep dla: a) uczenia; b) walidacji; c) testowania
Fig. 5. Absolute error Ep histograms for: a) learning; b) validation; c) testing



Rys. 6. Procent sukcesu SR neuronowej prognozy przekazywania drgań z gruntu na fundament
Fig. 6. Success Ratio SR versus relative error for the neural network prediction of the transmission of ground vibrations to the basement



Rys. 7. Wartości r_w wyznaczone na podstawie pomiarów i obliczone za pomocą sieci 3-3-1
Fig. 7. Experimentally evaluated values of r_w versus predicted ones with 3-3-1 network application

4. Wnioski

Stwierdza się niejednoznaczny sposób przekazywania się drgań z gruntu na fundament budynku o średniej wysokości w zakresie redukcji maksymalnych wypadkowych przyspieszeń drgań poziomych. Nie jest możliwe wyznaczenie dokładnej zależności między PGA i PGF , choć można dopatrywać się wpływu energii wstrząsu, odległości epicentralnej i wartości PGA na tę relację.

Ze względu na ww. trudności wydaje się, że zaproponowana prosta sieć neuronowa może być przydatna do prognozowania różnic w jednocześnie występujących drganiach fundamentu budynku i gruntu.

BIBLIOGRAFIA

1. Kuźniar K., Maciąg E.: Zastosowanie SSN w wyznaczeniu wpływu wstrząsów górniczych na interakcję dynamiczną grunt-budynek. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, s. Budownictwo, z. 28, t. 2, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2006, s. 187-196.
2. Kuźniar K., Maciąg E., Tatara T.: Acceleration response spectra from mining tremors. 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES), Geneva, Switzerland 2006, p. 466-467 (full paper on CD).
3. Kuźniar K.: Analiza drgań budynków ścianowych o średniej wysokości podlegających wstrząsom górniczym z wykorzystaniem sieci neuronowych. Monografia 310, s. Inżynieria Lądowa, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.
4. Maciąg E.: Ocena szkodliwości wstrząsów górniczych dla budynków na podstawie drgań ich fundamentów czy gruntu? Inżynieria i Budownictwo, nr 12/2005.
5. Instrukcja prowadzenia powierzchniowych pomiarów sejsmometrycznych, interpretacji wyników oraz oceny i prognozowania drgań sejsmicznych wywołanych wstrząsami górniczymi na powierzchni LGOM w oparciu o skalę GSI-2004, 2004.
6. Demuth H., Beale M., Hagan M.: Neural Network Toolbox for use with Matlab 5. User's Guide, 2005-2007.
7. Osowski S.: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.