

## 2

# WYKORZYSTANIE SIECI NEURONOWYCH DO OBLICZANIA PRĘDKOŚCI I PRZYSPIESZEŃ DRGAŃ GRUNTU WYWOŁYWANYCH WSTRZĄSAMI GÓROTWORU

### 2.1 WPROWADZENIE

Pomimo spadku wydobycia węgla kamiennego w kopalniach GZW w ostatnich latach, nie obserwuje się równoczesnego zmniejszenia liczby rejestrowanych wstrząsów wysokoenergetycznych (o umownie przyjętej energii sejsmicznej równej lub większej od  $1 \times 10^5$  J). Liczba takich zjawisk występujących w rocznych przedziałach czasu, podlega dużym fluktuacjom, warto jednak zwrócić uwagę na wzrost liczby rejestrowanych wstrząsów wysokoenergetycznych w latach 2012-2014. I tak: w 2012 r. odnotowano 1022 zjawiska o energii przekraczającej  $1 \times 10^5$  J, w 2013 r. 1427, natomiast w 2014 r. liczba ta wzrosła do 1765 [15]. Pomimo przypuszczalnego dalszego ograniczania wydobycia węgla kamiennego nie należy oczekiwać zmniejszenia zagrożenia sejsmicznego w kopalniach GZW. Jest to spowodowane m.in. intensyfikacją wydobycia w już udostępnionych partiach złoża, a także koniecznością sięgania po zasoby resztkowe, zalegające na coraz większych głębokościach. Eksploatacji prowadzonej w takich warunkach z reguły towarzyszą wysokoenergetyczne wstrząsy górotworu. Silne wstrząsy górotworu indukowane prowadzonymi robotami górniczymi często wywołują odczuwalne drgania powierzchni, które sporadycznie są powodem występowania uszkodzeń obiektów budowlanych. Ze względu na to, że praktycznie niemożliwe jest prowadzenie ciągłych obserwacji sejsmometrycznych we wszystkich obiektach objętych dynamicznymi wpływami eksploatacji, konieczne jest określanie parametrów drgań w obiektach nieobjętych obserwacją z wykorzystaniem zależności regresyjnych wiążących parametry drgań gruntu z energią sejsmiczną wywołujących je wstrząsów i ich odległościami hipocentralnymi. Zależności te służą także do estymacji parametrów drgań powierzchni, które mogą zostać wygenerowane przez wstrząsy o prognozowanych energiach, towarzyszące projektowanej eksploatacji górniczej. Powszechnie do tego celu wykorzystywany jest prosty model regresji liniowej, nazywany relacją tłumienia.

W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu sprawdzenie możliwości wykorzystania do obliczania parametrów drgań gruntu odpowiednio wytrenowanej sieci neuronowej.

Ze względu na wiele zalet sieci neuronowe są coraz częściej wykorzystywane do rozwiązywania różnych zagadnień geofizyki górniczej i geomechaniki [np. 6, 7, 8, 9, 14, 17]. W prezentowanych badaniach informację wejściową stanowiły parametry analogiczne do wykorzystywanych w zależnościach regresyjnych: wartości energii sejsmicznej wstrząsu oraz odległości hipocentrum wstrząsu od rozpatrywanego punktu powierzchni terenu. Poligon badawczy stanowiła silnie zagrożona wstrząsami kopalnia węgla kamiennego w GZW.

## 2.2 WYNIKI OBSERWACJI PARAMETRÓW DRGAŃ GRUNTU INDUKOWANYCH WSTRZĄSAMI GÓRNICZYMI

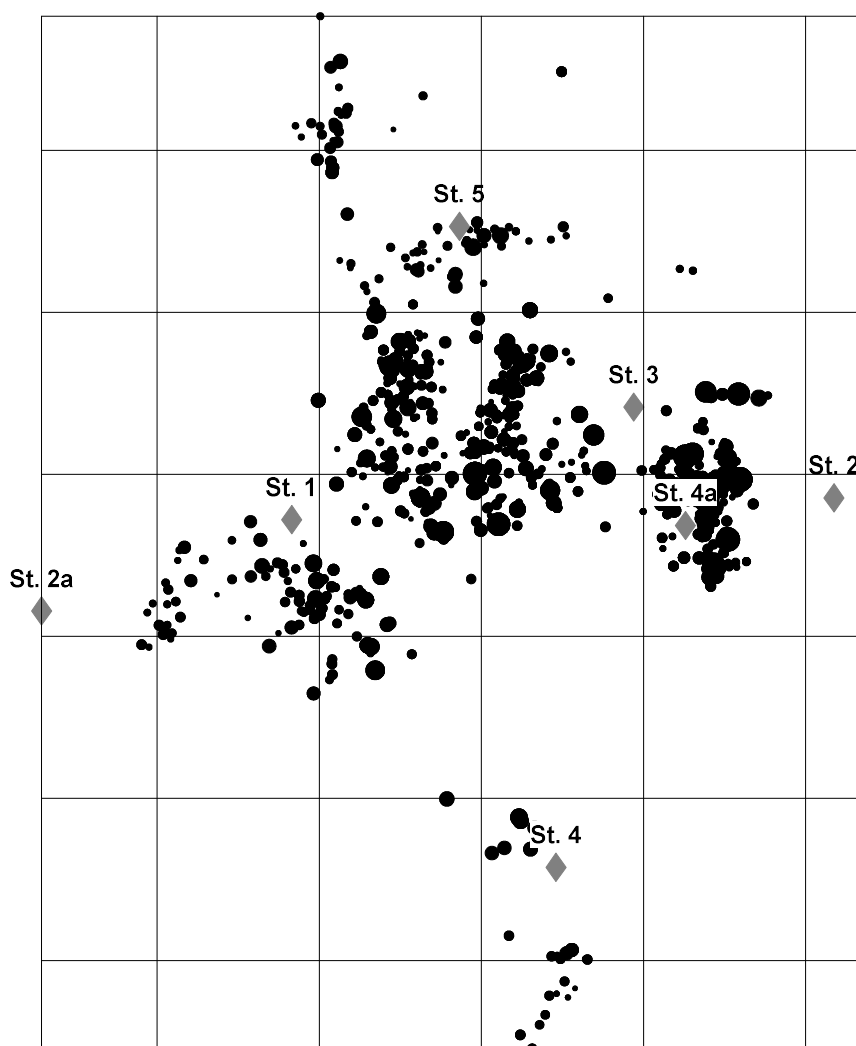
W rozpatrywanym rejonie rejestracje parametrów drgań gruntu wywołanych wstrząsami górniczymi prowadzone są za pomocą 5 zestawów aparatury pomiarowej (St.1÷St.5) W okresie, z którego pochodziły dane uwzględnione w prowadzonych badaniach (lata 2009÷2015), lokalizacja stanowisk St.2 i St.4 została zmieniona w celu dostosowania jej do aktualnego położenia frontu eksploatacyjnego, a tym samym objęcia obserwacjami rejonów szczególnie narażonych na oddziaływanie drgań gruntu indukowanych prowadzonymi robotami górniczymi.

W ciągu siedmiu lat prowadzenia obserwacji zarejestrowano 1610 przypadków drgań gruntu wywołanych wstrząsami górotworu. Rozkład epicentrów tych wstrząsów oraz położenie stanowisk aparatury pomiarowej przedstawiono na rys. 2.1. Zaobserwowane drgania były wywołane wstrząsami o energiach sejsmicznych wynoszących od  $1 \times 10^5$  J do  $1 \times 10^8$  J (większość wskutek wstrząsów o energii rzędu  $10^6$  J), które wystąpiły w zróżnicowanych odległościach hipocentralnych, zawierających się w przedziale od 610 m do około 5153 m, przy czym dominowały odległości nieprzekraczające 2000 m.

Dla każdego zarejestrowanego przypadku drgań Kopalnia określa maksymalną amplitudę wypadkowej poziomych składowych przyspieszeń (w paśmie częstotliwości do 10 Hz) i prędkości drgań gruntu, a także czas trwania zjawiska. Większość występujących wstrząsów wywołuje drgania rejestrowane na kilku stanowiskach aparatury pomiarowej.

Zakres wartości maksymalnych amplitud wypadkowych poziomych składowych przyspieszeń drgań gruntu w rozpatrywanym okresie wyniósł od  $0,001 \text{ m/s}^2$  do  $1,2 \text{ m/s}^2$ , natomiast maksymalnych amplitud wypadkowych poziomych składowych prędkości drgań gruntu: od  $0,0002 \text{ m/s}$  do  $0,054 \text{ m/s}$ . Czas trwania drgań wynosił odpowiednio: od  $0,57 \text{ s}$  do  $6,93 \text{ s}$  oraz od  $0,74 \text{ s}$  do  $7,49 \text{ s}$ . W przeważającej liczbie przypadków (94% wszystkich zarejestrowanych drgań), maksymalne amplitudy wypadkowych poziomych składowych przyspieszeń drgań nie przekroczyły górnej granicy 0 stopnia intensywności wg skali GSI-GZW<sub>KW</sub>-2012 [5], wynoszącego  $0,15 \text{ m/s}^2$ . Jedynie bardzo niewielka ich część (2%) charakteryzowała się

maksymalnymi amplitudami wypadkowych poziomych składowych przyspieszenia przekraczającymi wartość graniczną I stopnia intensywności, wynoszącą  $0,3 \text{ m/s}^2$  (przy założeniu, że czas trwania drgań przekracza 3 s). Wyniki obserwacji wypadkowych poziomych składowych prędkości drgań gruntu pozwoliły stwierdzić, że w ponad 91% zarejestrowanych przypadków nie zostały przekroczone wartości kryterialne ustalone dla 0 stopnia intensywności, wynoszące  $0,005 \text{ m/s}$ . Tylko 2,5% zarejestrowanych drgań charakteryzowało się maksymalnymi amplitudami wypadkowych poziomych składowych prędkości przekraczającymi  $0,01 \text{ m/s}$  – granicę pomiędzy I i II stopniem intensywności (przy założeniu analogicznego jak dla analizy obserwacji przyspieszeń drgań czasu trwania drgań).



Rys. 2.1 Schemat rozmieszczenia stanowisk aparatury pomiarowej oraz epicentra wstrząsów, które wywołały zarejestrowane drgania powierzchni.  
Odległość pomiędzy liniami siatki układu współrzędnych wynosi 500 m

Wartości prędkości i przyspieszenia drgań powierzchni terenu zależne są od amplifikacji drgań skalnego podłoża, wywołanej przez występujące w miejscu obserwacji warstwy luźnego nadkładu. Wpływ ten charakteryzowany jest przez tzw. współczynnik amplifikacji drgań, który określa wzmocnienie bądź osłabienie maksymalnych amplitud drgań podczas ich przechodzenia przez występujące utwory nadkładu, w stosunku do amplitud drgań skalnego podłoża. W celu oszacowania wartości współczynnika amplifikacji drgań niezbędne jest uwzględnienie prędkości fali w nadkładzie oraz w skalnym podłożu, a także częstotliwości drgań, która zależy od energii wstrząsu je wywołujących. W prowadzonych badaniach wartość współczynnika amplifikacji drgań dla stanowisk pomiarowych wyznaczono programem NERA [2], umożliwiającym uwzględnienie wpływu dowolnej liczby poziomo zalegających warstw luźnego nadkładu leżących na półprzestrzeni, z której rozchodzi się fala sejsmiczna, na wartość współczynnika amplifikacji drgań. Obliczenia wykonywane są metodą różnic skończonych. Program pozwala uwzględnić nieliniową charakterystykę odkształceniowo-naprężeniową rozpatrywanych warstw skalnych.

Czwartorzęd w przedmiotowym obszarze zalega bardzo nieregularnie, zbudowany jest z osadów: holoceniowych – głównie drobno- i średnioziarnistych piasków oraz plejstoceniowych – głównie glin morenowych, piasków i żwirów. Trzeciorzęd zbudowany jest głównie z iłów pylastych, piaszczystych i marglistych, natomiast utwory triasowe reprezentowane są przez pstry piaskowce oraz drobno i średnioziarniste iłowce.

Do wyznaczenia wartości współczynnika amplifikacji drgań przyjęto odczytane z map hydrogeologicznych dane dotyczące miąższości warstw budujących czwartorzęd i trzeciorzęd, oraz wartości ich gęstości podane w normie PN-82/B-02001. Uwzględniono prędkość rozchodzenia się fali poprzecznej wyznaczoną w wyniku pomiarów przeprowadzonych na rozpatrywanym obszarze górniczym przez autorów pracy [4]. Prędkość ta zwiększa się od 300 m/s dla warstw przypowierzchniowych do 900 m/s dla skalnego podłoża. Obliczenia wykonano dla częstotliwości drgań od 1 Hz do 10 Hz, z krokiem 1 Hz. Wybrano największą wyznaczoną wartość współczynnika amplifikacji drgań. Budowę utworów czwartorzędowych i trzeciorzędowych oraz wyniki obliczeń wartości współczynnika amplifikacji drgań w miejscach zainstalowania aparatury pomiarowej podano w tabeli 2.1.

W celu wyeliminowania wpływu budowy luźnych warstw nadkładu na drgania gruntu, wartości zaobserwowanych maksymalnych przyspieszeń i prędkości tych drgań podzielono przez obliczone wartości współczynnika amplifikacji w miejscach pomiaru. Przejście od drgań powierzchni terenu do drgań skalnego podłoża pozwala na opracowywanie jednej relacji tłumienia dla całego zbioru obserwacji (w przeciwnym przypadku zróżnicowanie wartości współczynnika amplifikacji drgań powodowałoby zwiększenie odchylenia standardowego składnika resztowego). Oczywiście oznacza to, że wartości otrzymane wyznaczoną relacją tłumienia określają drgania podłoża skalnego. W celu określenia parametrów drgań gruntu należy

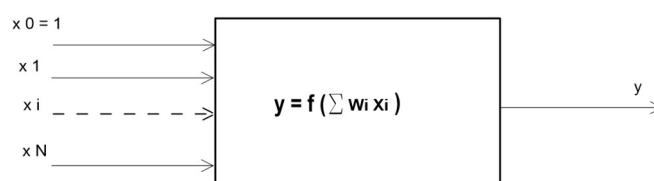
pomnożyć je przez wartość współczynnika amplifikacji drgań wyznaczoną dla rozpatrywanego punktu powierzchni terenu.

**Tabela 2.1 Budowa warstw trzeciorzędu i czwartorzędu, wartość współczynnika amplifikacji drgań**

Nazwa stanowiska	Budowa utworów		Wartość współczynnika amplifikacji drgań
	trzeciorzędowych	czwartorzędowych	
St.1	0 m	3 m ropy piaszczyste 17 m piaski	2,6
St.2	3 m ropy 3 m piaski 4 m ropy 9 m piaski	3 m gliny	2,6
St.2a	0 m	4 m ropy 3 m piaski	2,4
St.3	8 m ropy 2 m piaski 11 m ropy piaszczyste 13 m piaski	10 m gliny	4,2
St.4	2 m piaski 15 m ropy	5 m piaski 1,5 m żwiry 2,5 m ropy	2,9
St.4a	0 m	4 m ropy 4 m piaski 9 m ropy	4,4
St.5	20 m ropy	8 m piaski 7 m gliny 7 m ropy	3,6

### 2.3 OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA SIECI NEURONOWYCH

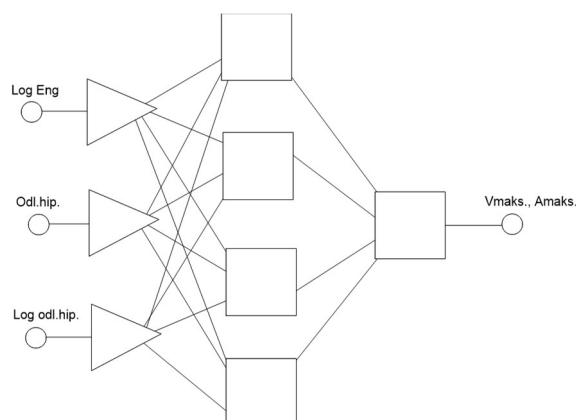
Sztuczne sieci neuronowe stanowią uniwersalny układ aproksymacyjny, pozwalający odwzorowywać wielowymiarowe zbiory danych, mający zdolność uczenia się i adaptacji do zmieniających się warunków środowiskowych oraz zdolność uogólniania nabytej wiedzy, stanowiąc pod tym względem system sztucznej inteligencji [13]. Sztuczne sieci neuronowe korzystają z uproszczonego modelu neuronu, w którym przyjęto, że obliczana jest ważona suma sygnałów wejściowych i gdy przekroczy ona poziom progowy, sygnał podawany jest na wyjście – rys. 2.2. Funkcja aktywacji  $f$  może mieć różną postać, w wykorzystanym w prowadzonych badaniach pakiecie Statistica [16] dostępne są następujące jej postacie: liniowa, logistyczna, tangens hiperboliczny, wykładnicza oraz sinus.



**Rys. 2.2 Model neuronu**

W odróżnieniu od metod parametrycznych (np. metody analizy regresji), wymagających znajomości funkcji wiążących zmienne objaśniane ze zmiennymi

objaśniającymi, sieci neuronowe, będące metodami nieparametrycznymi, nie zakładają posiadania takiej apriorycznej informacji – automatycznie uczą się na podanych przez użytkownika danych pokazujących, jak manifestuje się interesująca zależność [16]. Możliwość różnego sposobu połączenia neuronów między sobą i ich współdziałania spowodowała powstanie różnych typów sieci neuronowych i związanych z nimi metod doboru wag (uczenia sieci). Do najprostszych, mających jednak praktyczne znaczenie, można zaliczyć sieci jednokierunkowe, wielowarstwowe (rys. 2.3).



Rys. 2.3 Model sieci jednokierunkowej, wielowarstwowej

Sieci te składają się z warstwy wejściowej, wprowadzającej do sieci dane wejściowe. Neurony z warstw ukrytych i z warstwy wyjściowej połączone są z neuronami z poprzedniej warstwy. Wartości zmiennych wejściowych przekazywane są do neuronów wejściowych, następnie do neuronów warstw ukrytych i warstwy wyjściowej. W każdym neuronie obliczana jest ważona suma wejść. Każdy neuron posiada także dodatkowe wejście, które ma przyporządkowaną wartość równą 1, która także podlega wymnożeniu przez wyznaczoną wagę. Następnie wyznaczana jest wartość wyjściowa, zależna od informacji wejściowej i przyjętej funkcji aktywacji. Wynik działania całej sieci pojawia się na wyjściach neuronów warstwy wyjściowej. W prowadzonych badaniach informację wejściową stanowiły wartości logarytmów energii wstrząsów, ich odległości hipocentralnych, a także logarytmów tych odległości. Na wyjściu sieci otrzymywano wartości maksymalnych amplitud wypadkowych poziomych składowych prędkości lub przyspieszeń drgań gruntu.

#### 2.4 ZALEŻNOŚCI REGRESYJNE ZAREJESTROWANYCH PARAMETRÓW DRGAŃ GRUNTU WZGLĘDEM ENERGII WSTRZĄSÓW I ODLEGŁOŚCI EPICENTRALNYCH, REZULTATY ZASTOSOWANIA SIECI NEURONOWEJ

Wykorzystując omówiony zbiór obserwacji wyznaczono parametry modelu regresji wypadkowych poziomych składowych przyspieszeń i prędkości drgań względem energii sejsmicznych i odległości hipocentralnych wstrząsów towarzyszących eksploatacji. W literaturze można znaleźć bardzo wiele przykładów zastosowań różnych postaci relacji tłumienia wybranego parametru drgań – na przykład [1, 3, 10, 11, 12]. Autorzy wykorzystali powszechnie akceptowaną relację

(2.1), mającą jednak uzasadnienie fizyczne, szczegółowo przedstawione w [11]. Model ten jest szeroko stosowany, niezależnie od wielkości źródeł (zarówno w odniesieniu do trzęsień Ziemi jak i wstrząsów indukowanych działalnością człowieka) [10]. W przyjętym modelu regresji logarytm maksymalnej amplitudy wypadkowej poziomych składowych przyspieszeń (prędkości) drgań określa poniższe wyrażenie:

$$\log a = a_1 \log E + a_2 R + a_3 \log R + a_4 + \varepsilon \quad (2.1)$$

gdzie:

$a$  – maksymalna amplituda przyspieszeń (prędkości) drgań gruntu [ $m/s^2$ ,  $m/s$ ],

$E$  – energia sejsmiczna wstrząsu [J],

$R$  – odległość epicentralna [m],

$a_i$  – parametry modelu regresji,

$\varepsilon$  – składnik losowy.

Wyniki estymacji parametrów modelu metodą najmniejszych kwadratów podano w tabeli 2.2 – analiza dotyczyła zarówno zaobserwowanych przyspieszeń jak i prędkości drgań.

**Tabela 2.2 Wyniki analizy regresji – model opisany równaniem (2.1)**

<b>Wyniki analizy maksymalnych amplitud wypadkowych poziomych składowych przyspieszeń drgań</b>		
<b>Współczynnik korelacji pomiędzy wartościami obserwowanymi i obliczonymi z równania regresji <math>R = 0,67</math></b>	<b>Współczynnik determinacji <math>R^2 = 0,45</math></b>	<b>Błąd średniokwadratowy <math>0,065 m/s^2</math></b>
<b>Parametr</b>	<b>Wartość parametru</b>	<b>Błąd standardowy parametru</b>
$a_1$	0,39959	0,013415
$a_2$	0,00056	0,000047
$a_3$	-3,16978	0,194523
$a_4$	4,78134	0,545688
<b>Wyniki analizy maksymalnych amplitud wypadkowych poziomych składowych prędkości drgań</b>		
<b>Współczynnik korelacji pomiędzy wartościami obserwowanymi i obliczonymi z równania regresji <math>R = 0,55</math></b>	<b>Współczynnik determinacji <math>R^2 = 0,30</math></b>	<b>Błąd średniokwadratowy <math>0,003 m/s</math></b>
<b>Parametr</b>	<b>Wartość parametru</b>	<b>Błąd standardowy parametru</b>
$a_1$	0,37238	0,014583
$a_2$	0,00030	0,000049
$a_3$	-1,23522	0,204066
$a_4$	-2,16821	0,577329

Na przyjętym poziomie istotności wynoszącym 0,99, na podstawie wyników testu F Fischera-Snedecora, nie ma podstaw do uznania, że regresja jest nieistotna. Również wyniki obliczeń testu t-Studenta dla współczynników regresji wskazują, że wszystkie wyznaczone parametry modelu regresji są statystycznie istotne. Należy jednak zwrócić uwagę na niemający fizycznego sensu dodatni znak parametru  $a_2$  (w obu analizowanych przypadkach). Dodatnia wartość parametru  $a_2$  oznacza,

że obliczona z równania (2.1) amplituda wypadkowej poziomych składowych przyspieszeń (prędkości) drgań wywołanych wstrząsem o ustalonej energii sejsmicznej zwiększa się w miarę wzrostu odległości hipocentralnej.

Dla analogicznego zbioru obserwacji, korzystając z pakietu Statistica [16], wykonano obliczenia z wykorzystaniem sieci neuronowej. Dane charakteryzujące zmiany wartości przyspieszeń (prędkości) drgań gruntu oraz wartości energii sejsmicznej wstrząsów, odległości hipocentralnych oraz logarytmów tych odległości zostały podzielone na 3 podzbiory: danych uczących (70% przypadków), danych testowych (15% przypadków) oraz danych walidacyjnych (15% przypadków). Pierwszy z powyższych zbiorów został wykorzystany do nauki sieci, drugi – do sprawdzania postępów trenowania sieci i zakończenia procesu uczenia przed wystąpieniem tzw. przeuczenia sieci – zjawiska polegającego na nadmiernym dopasowaniu do konkretnego zbioru przypadków kosztem utraty zdolności uogólniania wiedzy. Ostatni z wyżej wymienionych zbiorów pozwolił ocenić jakość sieci. Na omawianym, początkowym etapie badań, przyjęto możliwie najprostszą budowę sieci – pojedyncza warstwa ukryta zawiera jedynie 4 neurony (rys. 2.3). Jako funkcję aktywacji przyjęto tangens hiperboliczny.

Wyniki obliczeń – wartości współczynników korelacji liniowej i determinacji wartości obserwowanych i obliczonych siecią neuronową, a także wartość błędu średniokwadratowego wyników obliczeń przyspieszeń i prędkości drgań gruntu podano w tabeli 2.3.

Tabela 2.3 Wyniki zastosowania sieci neuronowej

Współczynnik korelacji pomiędzy wartościami obserwowanymi i obliczonymi R	Współczynnik determinacji R <sup>2</sup>	Błąd średniokwadratowy
<b>Wyniki analizy przyspieszeń drgań</b>		
0,74	0,55	0,061 m/s <sup>2</sup>
<b>Wyniki analizy prędkości drgań</b>		
0,60	0,36	0,003 m/s

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że zastosowanie sieci neuronowej pozwoliło uzyskać dokładniejszy opis zarejestrowanych wartości przyspieszeń i prędkości drgań w porównaniu do rezultatów otrzymanych z wyznaczonej relacji tłumienia.

## 2.5 PROGNOZA PARAMETRÓW DRGAŃ GRUNTU Z WYKORZYSTANIEM RELACJI TŁUMIENIA ORAZ SIECI NEURONOWEJ

W celu określenia możliwości, a także porównania dokładności predykcji parametrów drgań gruntu wykonywanej metodą analizy regresji i siecią neuronową, rozpatrywany zbiór obserwacji parametrów drgań gruntu podzielono na dwa podzbiory, zawierające dane dotyczące zjawisk, które wystąpiły w okresach:



- 1.01.2009 r.÷31.12.2014 r. – wykorzystując rejestracje z tego okresu przeprowadzono estymację parametrów modelu regresji i naukę sieci neuronowej,
- 1.01.2015 r.÷31.12.2015 r. – wykorzystując wyznaczoną relację tłumienia i wytrenowaną sieć neuronową przeprowadzono obliczenia wartości maksymalnych wypadkowych poziomych składowych przyspieszeń i prędkości drgań gruntu. Prognozowane wartości porównano z zaobserwowanymi w tym okresie.

Wyniki analizy dokładności obliczeń prognostycznych dla drugiego z rozpatrywanych okresów podano w tabeli 2.4.

**Tabela 2.4 Wyniki zastosowania modelu opisanego równaniem (2.1) oraz sieci neuronowej do prognozy maksymalnych wypadkowych poziomych składowych przyspieszeń i prędkości drgań powierzchni terenu**

	Współczynnik korelacji pomiędzy wartościami obserwowanymi i obliczonymi R	Współczynnik determinacji R <sup>2</sup>	Błąd średniokwadratowy
<b>Wyniki analizy przyspieszeń drgań</b>			
Model (1)	0,77	0,60	0,076 m/s <sup>2</sup>
Sieć neuronowa	0,81	0,66	0,066 m/s <sup>2</sup>
<b>Wyniki analizy prędkości drgań</b>			
Model (1)	0,79	0,62	0,003 m/s
Sieć neuronowa	0,83	0,69	0,003 m/s

Zastosowana sieć neuronowa, pomimo jej prostoty, umożliwiła stosunkowo dokładną prognozę parametrów drgań gruntu. Obliczone wartości maksymalnych wypadkowych poziomych składowych przyspieszeń i prędkości drgań gruntu są silniej skorelowane z wartościami zarejestrowanymi niż w przypadku wyznaczania ich z estymowanej relacji tłumienia – modelu (2.1).

## 2.6 PODSUMOWANIE

Obliczenia przeprowadzone dla wybranego rejonu silnie zagrożonej sejsmicznie kopalni GZW pozwoliły stwierdzić możliwość wykorzystania sieci neuronowych do opisu wartości przyspieszeń i prędkości drgań gruntu wywoływanych wstrząsami górnictwami. Odpowiednio wytrenowana sieć neuronowa może być wykorzystywana do prognozy parametrów drgań powierzchni terenu generowanych wstrząsami górotworu, występującymi w trakcie prowadzenia w danym rejonie projektowanych robót górniczych. Dla analizowanego zbioru obserwacji wyniki prognozy wykonanej siecią neuronową okazały się silniej skorelowane z zaobserwowanymi wartościami parametrów drgań gruntu niż oceny uzyskane w rezultacie zastosowania powszechnie wykorzystywanej do tego celu relacji tłumienia. W trakcie dalszych badań zweryfikowana zostanie zdolność uogólniania wiedzy – możliwość wykonywania oszacowań w różnych rejonach narażonych na występowanie drgań powierzchni terenu wywoływanych wstrząsami górotworu.

## LITERATURA

1. G.M. Atkinson, D.M. Boore. „Earthquake ground-motion prediction equation for eastern North America.” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 96, pp. 2181-2205, 2006.
2. J.P. Bardet, T. Tobita. *NERA: A Computer program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered soil deposits*. Ed. Department of Civil Engineering, University of Southern California, 2001.
3. D.M. Boore, W.B. Joyner. „The empirical prediction of ground motion.” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 72, pp. 43-60, 1982.
4. J. Dubiński i in. „Zasady stosowania górniczej skali intensywności drgań GSI-GZW<sub>KW</sub> do oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż węgla kamiennego w zakładach górniczych Kompanii Węglowej S.A. na obiekty budowlane i na ludzi.” Katowice, 2008. [niepublikowane]
5. J. Dubiński i in. „Zasady stosowania zweryfikowanej górniczej skali intensywności drgań GSI<sub>GZW<sub>KW</sub></sub>-2012 do prognozy i oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż węgla kamiennego w zakładach górniczych Kompanii Węglowej S.A. na obiekty budowlane i na ludzi.” Katowice, 2013. [niepublikowane]
6. J. Jakubowski, A. Tajduś. „Predictive regression models of monthly seismic energy emissions induced by longwall mining.” *Arch. Min. Sci.*, vol. 59, no. 3, pp. 705-720, 2014.
7. J. Jakubowski, Ł. Lenart, Ł. Ożóg. „Predykcijny model dobowej emisji energii sejsmicznej indukowanej eksploatacją górniczą.” *Przegląd Górniczy*, nr 3, pp. 18-25, 2014.
8. J. Kabiesz. „Badanie kategoryzacji zagrożenia tąpnięciami z wykorzystaniem sieci neuronowych.” *Prace Naukowe GIG: Górnictwo i Środowisko*, nr VII, pp. 93-104, 2008.
9. K. Kuźniar. „Neural networks for the analysis of mine-induced building vibrations.” *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, no. 18, pp. 147-159, 2011.
10. S. Lasocki, M. Szybiński, J. Matuszczyk, J. Mirek, A. Pielesz. „Prognozowanie drgań powierzchni wywołanych wstrząsami górniczymi – przegląd krytyczny,” *Materiały Sympozjum Warsztaty 2000, Ustroń Śl., Kraków, 2000*, pp. 261-279.
11. E. Markowski, J. Kornowski, W.M. Zuberek. *Podsumowanie i analiza wyników powierzchniowych obserwacji przyspieszeń pochodzących od wstrząsów górniczych z zakładów górniczych zrzeszonych w Bytomskiej Spółce Węglowej S.A. za okres 1998-2000*. Sosnowiec: Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi Oddział Górnośląski, 2002.
12. D. Olszewska, S. Lasocki. „Relacja tłumienia wartości szczytowej przyspieszenia drgań gruntu z uwzględnieniem amplifikacji dla wybranych rejonów obszaru LGOM,” *Warsztaty Górnicze 2006 „Zagrożenia naturalne w górnictwie”*, Kraków–Tomaszowice, 2006, pp. 293-307.
13. S. Ossowski. *Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*. Warszawa: WNT, 1996.
14. M.M. Poulton. *Computational neural networks for geophysical data processing*. Ed. Elsevier Science Ltd., 2001.
15. K. Stec. „Zagrożenie sejsmiczne” in *Raport roczny (2014) o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego*. J. Kabiesz, Ed. Katowice: GIG, 2015.
16. StatSoft, Inc. (2011). STATISTICA (data analysis software system), version 10.

17. R. Tadeusiewicz. „Neural networks in mining sciences – general overview and some representative examples.” *Arch. Min. Sci.*, vol. 60, no. 4, pp. 971–984, 2015.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017

**dr hab. inż. Piotr Bańka, prof. Pol. Śl.**  
Politechnika Śląska,  
Wydział Górnictwa i Geologii  
Instytut Eksploatacji Złóż  
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska  
e-mail: piotr.bank@polsl.pl

**mgr inż. Ewelina Lier**  
FAMUR S.A.  
ul. Armii Krajowej 51  
40-698 Katowice, Polska  
e-mail: famur@famur.com.pl

### WYKORZYSTANIE SIECI NEURONOWYCH DO OBLICZANIA PRĘDKOŚCI I PRZYSPIESZEŃ DRGAŃ GRUNTU WYWOŁYWANYCH WSTRZĄSAMI GÓROTWORU

**Streszczenie:** W wielu kopalniach istotny problem stanowią drgania gruntu wywoływane silnymi wstrząsami indukowanymi prowadzonymi robotami górniczymi. W rejonach, w których stwierdza się występowanie drgań powierzchni terenu generowanych wstrząsami górotworu, konieczne jest sporządzanie prognoz parametrów drgań gruntu, które mogą wystąpić w trakcie realizacji założeń projektowych zakładów górniczych. W artykule przedstawiono wyniki badań, których celem było określenie możliwości zastosowania, do prognozy parametrów drgań gruntu wywoływanych wstrząsami, sieci neuronowych. Wykorzystano obserwacje drgań gruntu pochodzące z obszaru jednej z silnie zagrożonych sejsmicznie kopalń GZW. Otrzymane rezultaty wykazały możliwość zastosowania sieci neuronowych do obliczania wartości prędkości i przyspieszeń drgań powierzchni terenu powodowanych wstrząsami. Dla rozpatrywanego zbioru rejestracji uzyskano dokładniejsze wyniki niż w przypadku zastosowania powszechnie wykorzystywanego, prostego modelu regresji liniowej.

**Słowa kluczowe:** sejsmiczność indukowana, drgania powierzchni, sieci neuronowe

### USE OF NEURAL NETWORKS TO CALCULATE THE VELOCITY AND ACCELERATION OF GROUND VIBRATIONS CAUSED BY MINING TREMORS

**Abstract:** In many mines there is a problem with ground vibrations caused by severe tremors induced by carried out mining works. In the areas, where surface vibrations occurred due to high-energy tremors it is necessary to forecast the velocity and acceleration of vibrations that may occur during the future excavation process. This paper presents results of studies describing the possibility of using neural networks to forecast ground vibrations caused by mining tremors. During those studies data from highly seismically endangered region of Upper Silesian Coal Basin were used. The results of calculations proved the possibility of using neural networks to calculate the velocity and acceleration of ground vibrations caused by mining tremors. For the considered set of observations more precise results than, from widely used, a simple linear regression model, were obtained.

**Key words:** induced seismicity, ground vibrations, neural networks