



Zaburzenie w przebiegu przemieszczenia pionowego terenu jako prekursor wstrząsu górniczego

Disturbance in the run of vertical displacement of the ground as a precursor of mining tremor

Dr hab. inż. Violetta Sokoła-Szewiła, prof. w Pol. Śl. *)

Treść: Na podstawie dotychczasowych wyników badań czasowych zmian przemieszczeń pionowych terenu górniczego w okresie wystąpienia wstrząsu indukowanego eksploatacją ścianową przyjęto, że zaburzenie w przebiegu przemieszczenia może stanowić prekursor wstrząsu. Geneza i interpretacja zaburzenia związana jest z warunkami jego obserwowalności. W artykule przedstawiono wyznaczone zależności funkcyjne pomiędzy zaobserwowanym zaburzeniem w przebiegu przemieszczenia pionowego terenu w okresie poprzedzającym wystąpienie wstrząsu górniczego oraz energią sejsmiczną zarejestrowanego wstrząsu, czasem pomiędzy momentem stwierdzenia zaburzenia i wystąpieniem wstrząsu oraz odległością epicentralną. Zależności ustalono z wykorzystaniem metod analizy statystycznej. Wykorzystano wyniki ciągłych pomiarów przemieszczeń pionowych punktu obserwacyjnego zastabilizowanego w rejonie bezpośrednich wpływów eksploatacji ścianowej, prowadzonej w warunkach wysokiego zagrożenia sejsmicznego, w obszarze KWK „Rydułtowy-Anna”. Pomiarów przemieszczeń wykonano z wykorzystaniem techniki GPS. Dane o zarejestrowanych wstrząsach pozyskano z archiwów Kopalnianej Stacji Geofizyki. Analizowano zaburzenia, procesie przemieszczeń pionowych w okresie wystąpienia wstrząsów o energii sejsmicznej nie mniejszej niż $1 \cdot 10^5$ J.

Abstract: Basing on the existing results of the studies involving the vertical displacement changes of mining ground in time, during the occurrence of tremor induced by longwall mining, it was assumed that the disturbance in the run of the displacement could be viewed as the precursor of a tremor. The genesis and interpretation of the disturbance is connected with the conditions of its observability. This paper presents the determined function dependencies between the observed disturbance in the run of vertical displacement of the ground in the time period preceding the occurrence of the mining tremor and the seismic energy of the recorded tremor; the time between the moment when the disturbance was observed and the occurrence of the tremor and the epicentral distance. The dependencies were determined with the use of statistical analysis methods. We have used the results of continuous measurements of vertical displacements of the observed point stabilized in the area of direct impact of longwall mining carried out in the conditions of high seismic hazard in the area of “Rydułtowy-Anna” coal mine. The measurements of the displacements were carried out with the use of GPS technique. Data on the recorded tremors was collected from the archives of the Geophysics Station of the Coal Mine. The analysis involved the disturbances in the process of vertical displacements during the tremors of the seismic energy not lower than $1 \cdot 10^5$ J.

Słowa kluczowe:

deformacje terenu górniczego, przemieszczenia pionowe, aktywność sejsmiczna, wstrząsy górnicze

Key words:

mining ground deformation, vertical displacements, seismic activity, mining tremors

1. Wprowadzenie

Zagadnienia dotyczące sejsmiczności indukowanej działalnością górnictwem stanowią temat szeregu prac badawczych obejmujących różne aspekty tej problematyki. W Instytucie Eksploatacji Złóż Politechniki Śląskiej od wielu lat prowadzone są między innymi badania nad związkami między procesami deformacyjnymi powierzchni terenu i wstrząsami górnictwem. Zrealizowano obszerny program badań obejmujący pomiary ciągłe przemieszczeń pionowych pojedynczych punktów w rejonach prowadzonej eksploatacji ścianowej trzech kopalń węgla kamiennego. W ich wyniku stwierdzono, że w okresie związanym ze wstrząsem, szczególnie tym o wysokiej energii sejsmicznej obserwuje się pewien charak-

terystyczny przebieg ruchów pionowych terenu górniczego, w którym wyróżniono trzy następujące po sobie okresy. Okres I przed wystąpieniem wstrząsu, w którym obserwowano wypiętrzenie lub spowolnienie procesu obniżenia. Okres II, obejmujący pewien odcinek czasu przed wystąpieniem wstrząsu, chwilę jego wystąpienia oraz pewien odcinek czasu po wystąpieniu wstrząsu, w którym obserwowano duży przyrost obniżenia w krótkim czasie. Okres III, w którym obserwowano stabilizację procesu przemieszczeń pionowych. Obserwowane w okresach I, II charakterystyczne zmiany przemieszczeń pionowych uznano za rodzaj zaburzenia w przebiegu przemieszczenia, które przyjęto za prekursor wstrząsu. Szczegółowo wyniki badań przedstawiono w pracach [1,3,4,6].

Dla umożliwienia bieżącej oceny obserwowanych zmian przemieszczeń pionowych, pozwalającej na stwierdzenie

*) Politechnika Śląska, Gliwice

wystąpienia zaburzenia w przebiegu pionowych ruchów górotworu opracowano autoregresyjny model, opisujący przebieg zmian przemieszczenia pionowego punktu terenu górniczego na podstawie obserwowanych zmian przemieszczeń. Założono przy tym, że proces zmian przemieszczeń pionowych można uznać za stacjonarny proces stochastyczny, a przebieg zmian przemieszczeń można opisać stacjonarnym modelem autoregresji p -tego rzędu. Szczegółowo metodę opisano w pracy [5]

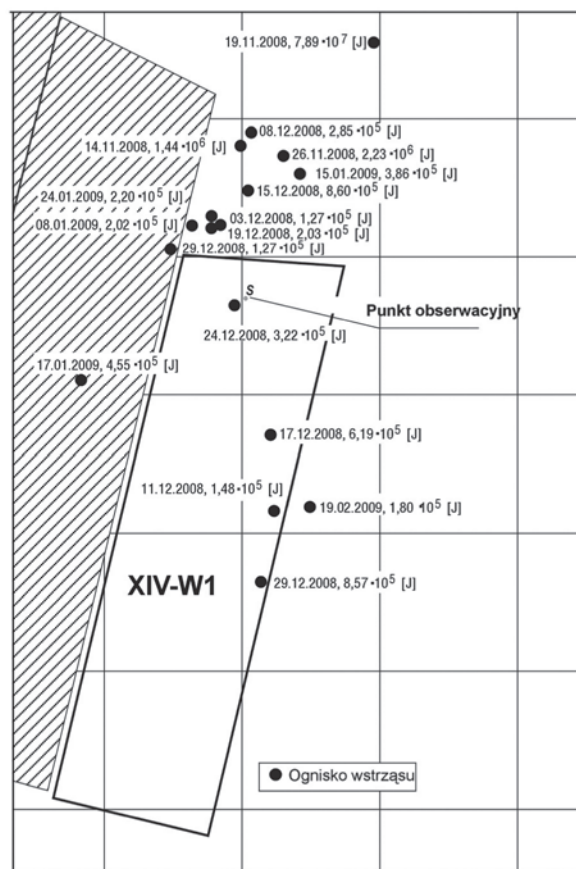
Geneza i interpretacja zaburzenia związana jest z warunkami jego obserwowalności. W artykule przedstawiono wyznaczone zależności funkcyjne pomiędzy zaobserwowanym zaburzeniem w przebiegu przemieszczenia pionowego terenu w okresie poprzedzającym wystąpienie wstrząsu górniczego oraz energią sejsmiczną zarejestrowanego wstrząsu, czasem pomiędzy momentem stwierdzenia zaburzenia i wystąpieniem wstrząsu oraz odległością epicentralną. Zależności te ustalono, wykorzystując wyniki badań przeprowadzonych w rejonie bezpośrednich wpływów eksploatacji ścianowej, prowadzonej w warunkach wysokiego zagrożenia sejsmicznego, w rejonie KWK „Rydułtowy-Anna”.

2. Materiał obserwacyjny

W ramach prowadzonych badań wykonano ciągle pomiary przemieszczeń pionowych na punkcie (rys. 1), zastabilizowanym w rejonie bezpośrednich wpływów eksploatacji prowadzonej ścianą XIV –W1 w pokładzie 713/1,2 KWK „Rydułtowy-Anna”. Roboty wybierkowe w polu obserwowanej ściany prowadzono systemem ścianowym podłużnym z zawalem stropu, na średniej głębokości 1000 m. Długość obserwowanej ściany wynosiła 245 m, wybieg średni 825 m. Pokład eksploatowano na wysokość 2,60 m do 3,20 m brutto. W rejonie ściany pokład zapada na E pod kątem od ok. 8° do 20°. Eksploatację w polu obserwowanej ściany rozpoczęto w październiku 2007 r. Pomiary ciągle wykonywano metodą statyczną, okresie od 10.11.2008 r. do 26.02.2009 r. za pomocą odbiornika sygnałów satelitarnych GPS. Dane GPS zostały opracowane w trybie postprocessingu, w postaci współrzędnych kartezjańskich prostokątnych WGS-84 (XYZ). Obliczenia wykonano dla 1-godzinnych sesji pomiarowych wykonywanych obserwacji. Błąd średni wyznaczenia współrzędnej Z dla wszystkich sesji pomiarowych wyniósł $m_s = \pm 0,0051$ m. Wartość odchylenia standardowego σ błędu m_z wyniosła 0,0017 m. W tym czasie zarejestrowano 106 wstrząsów o energiach sejsmicznych rzędu od 10^2 J do 10^7 J, które indukowały roboty górnicze prowadzone w polu obserwowanej ściany. W analizach uwzględniono 17 wstrząsów o energii sejsmicznej nie mniejszej niż 10^5 J, stanowiącej graniczny próg energetyczny dla wykonywanych analiz przebiegu przemieszczenia pionowego. Rozkład ognisk wstrząsów na tle konturów eksploatacji przedstawia rysunek 1. Zaburzenie w 11 przypadkach wystąpiło przed wstrząsem.

3. Zależności regresyjne pomiędzy zaburzeniem w przebiegu przemieszczenia pionowego i przyjętymi wielkościami charakteryzującymi wstrząs

W celu ustalenia zależności pomiędzy zaburzeniem w procesie przemieszczenia pionowego w oraz podstawowymi wielkościami charakteryzującymi wstrząs górniczy tj. odległością epicentralną d , energią sejsmiczną wstrząsu E oraz czasem t pomiędzy momentem stwierdzenia zaburzenia i momentem wystąpienia wstrząsu zastosowano metody analizy statystycznej. Analizowano 11 wstrząsów, w przypadku których zaburzenie zaobserwowano w okresie



Rys. 1. Rozkład ognisk wstrząsów o energii sejsmicznej $\geq 1 \cdot 10^5$ J, daty i energie sejsmiczne wstrząsów, lokalizacja punktu obserwacyjnego S na tle konturów eksploatacji w rejonie badań

Fig. 1. Distribution of focuses of the tremors with seismic energy $\geq 1 \cdot 10^5$ J, dates and seismic energies, location of the observed point S and the exploitation outlines in the research area

przed wystąpieniem wstrząsu. Wykorzystano liniowy model regresji wielokrotnej. Jako zmienną zależną przyjęto wartość zaobserwowanego zaburzenia w procesie przemieszczenia pionowego w określonego na podstawie opracowanego dla rejonu badań autoregresyjnego modelu procesu przemieszczeń pionowych. Zmienne niezależne stanowią: odległość epicentralna d , energia sejsmiczna wstrząsu E oraz czas zaburzenia t . Postać liniowego modelu regresji z n zmiennymi niezależnymi przedstawia wzór (1) [2]

$$Y_i = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \beta_{k+1} + \varepsilon_i \quad (i=1 \dots n) \quad (1)$$

gdzie:

- Y_i – zmienna zależna,
- $\beta_{1..n}$ – parametry modelu regresji,
- $x_{i1} \dots x_{ik}$ – zmienne niezależne,
- ε_i – zmienna losowa określona jako składnik losowy wyjaśniający rozrzut wartości Y_i wokół wartości oczekiwanej $E(Y/X=x_1, x_2, \dots, x_k)$,
- n – liczba obserwacji, $n > k + 1$.

Równanie regresji rozwiązywano przy założeniach:

- wartość oczekiwana zmiennej losowej $E(\varepsilon_i) = 0$ (2)
- wariancja zmiennej losowej D^2 przybiera stałą wartość σ^2 : $D^2(\varepsilon_i) = \sigma^2$ (3)
- składniki losowe są nieskorelowane.

Oceny parametrów modelu uzyskano przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów (MNK). O parametrach wnioskowano przy spełnieniu założenia o normalności rozkładów składników losowych. Obliczano współczynnik determinacji wielorakiej R^2 , stanowiący miarę dopasowania hiperplaszczyny regresji wyznaczonej metodą MNK do danych empirycznych. Na podstawie współczynnika determinacji określano współczynnik korelacji wielorakiej R , wskazujący jak skorelowana jest zmienna zależna ze wszystkimi zmiennymi niezależnymi jednocześnie.

W oparciu o statystykę F weryfikacji poddawano hipotezę $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$.

$$F = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 / k \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 / (n - k - 1) \right]} \quad (4)$$

gdzie:

$$\bar{Y} = \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right) / n$$

Y_i – wartość funkcji regresji z próby,

\hat{Y}_i – wartość estymowana,

n – liczba obserwacji,

k – liczba zmiennych niezależnych.

Założono poziom ufności 95%.

Analiza zależności zmiennej zależnej w_i od energii sejsmicznej E_i i odległości epicentralnej d_i wykazała występowanie pomiędzy zmiennymi zależności funkcyjnej w postaci (5):

$$w_i = 0,037474 + 0,002709 \cdot 10^{-7} E_i - 0,000025 d_i \quad (R=0,825416), \quad (i=1, \dots, n) \quad (p < 0,05) \quad (5)$$

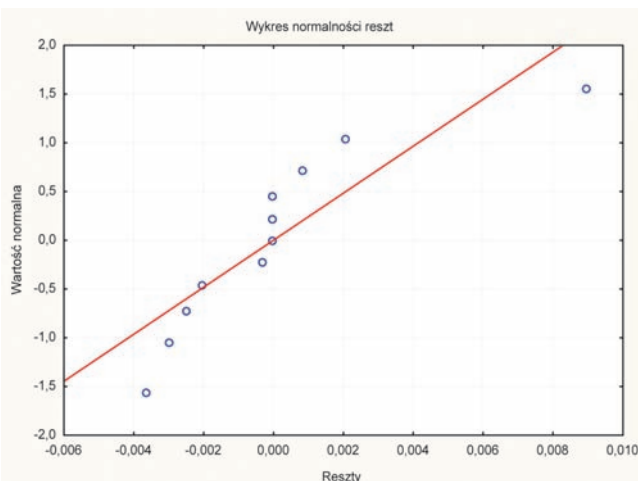
gdzie:

w_i – wartość zaburzenia w przemieszczeniu pionowym obserwowanego punktu w okresie poprzedzającym wystąpienie i -tego wstrząsu, m,

E_i – energia sejsmicznej E i -tego wstrząsu, J,

d_i – odległość epicentralna i -tego wstrząsu, m.

Wyznaczony współczynnik korelacji oraz oszacowane wartości parametrów są istotnie różne od zera na poziomie $p < 0,05$. Wartość współczynnika determinacji wielorakiej R^2 dla określonej zależności funkcyjnej wynosi 0,6813. Równanie wyjaśnia, zatem ponad 68% zmienności w_i . Przeprowadzona analiza rozkładu zmiennych resztowych (rys. 2) wykazała, że założenie normalności rozkładu można uznać za spełnione.



Rys. 2. Wykres normalności reszt (w, E, d) - opracowanie własne
Fig. 2. Graph of residuals normality (w, E, d), own elaboration

Analiza zależności zmiennej zależnej w_i od energii sejsmicznej E_i i czasu t_i wykazała występowanie pomiędzy zmiennymi zależności funkcyjnej w postaci (6):

$$w_i = 0,0028397 + 0,0016409 \cdot 10^{-7} E_i + 0,0005816 t_i \quad (R=0,9223779), \quad (p < 0,05), \quad (i=1, \dots, n) \quad (6)$$

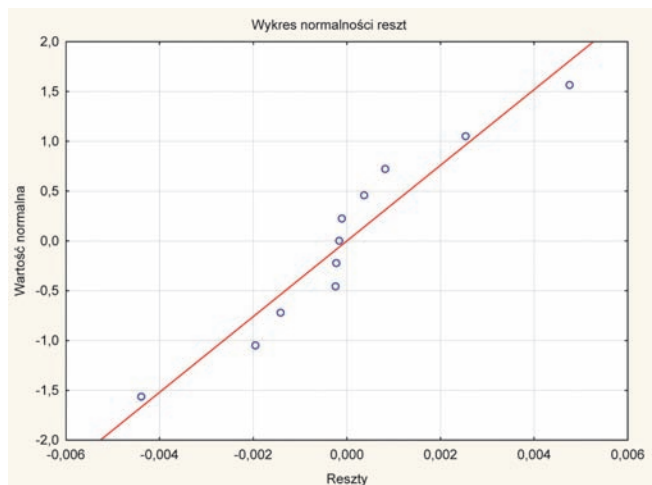
gdzie:

w_i – wartość zaburzenia w przemieszczeniu pionowym obserwowanego punktu w okresie poprzedzającym wystąpienie i -tego wstrząsu, m,

E_i – energia sejsmicznej E i -tego wstrząsu, J,

t_i – czas t pomiędzy momentem stwierdzenia zaburzenia i momentem wystąpienia wstrząsu i -tego wstrząsu, godzina.

Wyznaczony współczynnik korelacji oraz oszacowane wartości parametrów są istotnie różne od zera na poziomie $p < 0,05$. Wartość współczynnika determinacji R^2 dla określonej zależności funkcyjnej wynosi 0,8508. Równanie wyjaśnia, zatem ponad 85% zmienności w_i . Przeprowadzona analiza rozkładu zmiennych resztowych (rys. 3) wykazała, że założenie normalności rozkładu można uznać za spełnione.



Rys. 3. Wykres normalności reszt (w, E, t), opracowanie własne
Fig. 3. Graph of residuals normality (w, E, t), own elaboration

4. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiono zależności funkcyjne pomiędzy zaburzeniem w przebiegu przemieszczenia pionowego w okresie wstrząsu indukowanego eksploatacją ścianową oraz podstawowymi wielkościami charakteryzującym wstrząs górniczy. Zależności te ustalono z wykorzystaniem metod analizy statystycznej. Zastosowano linowy model regresji wielokrotnej. Stwierdzono:

1. Pomiędzy wartością obserwowanego zaburzenia w przebiegu przemieszczeń pionowych punktu terenu górniczego w okresie wstrząsu i odległością epicentralną oraz energią sejsmiczną wstrząsu istnieje statystycznie istotna zależność funkcyjna. Dla ustalonej zależności na poziomie istotności $p < 0,05$, można stwierdzić, że współczynnik korelacji oraz współczynniki regresji są istotnie różne od zera, co implikuje, że energia sejsmiczna wstrząsu oraz odległość epicentralna ma istotny wpływ na wartość obserwowanego zaburzenia.

2. Pomiędzy wartością obserwowanego zaburzenia w przebiegu przemieszczeń pionowych punktu terenu górniczego w okresie wstrząsu i czasem pomiędzy momentem stwierdzenia zaburzenia i momentem wystąpienia wstrząsu oraz energią sejsmiczną wstrząsu istnieje statystycznie istotna zależność funkcyjna. Dla ustalonej zależności na poziomie istotności $p < 0,05$, można stwierdzić, że współczynnik korelacji oraz współczynniki regresji są istotnie różne od zera, co implikuje, że energia sejsmiczna wstrząsu oraz czas t ma istotny wpływ na wartość obserwowanego zaburzenia.

Powyższe potwierdza zasadność przyjęcia zaburzenia w procesie przemieszczenia pionowego jako prekursora wstrząsu górniczego. Ustalone zależności wskazują na celowość prowadzenia dalszych badań nad doskonaleniem metody prognozowania wysokoenergetycznych zjawisk sejsmicznych na podstawie ciągłych obserwacji ruchów terenu górniczego w rejonie oddziaływania frontów ścianowych. Wskazują one na potencjalne możliwości określania podstawowych parametrów istotnych dla prognozy zjawiska sejsmicznego w zakresie czasu, miejsca, jak i energii sejsmicznej wstrząsu.

Literatura

1. *Bialek J., Sokola-Szewiolo V.*: Approximation methods of the continuous measurements of the mining ground subsidence within short time period allowing for the changes of longwall front advance. 253-265. Aachen International Mining Symposia. Rockbolting and Rock Mechanics in Mining. 30-31. May 2012. RWTH Aachen University.
2. *Draper N.R., Smith H.*: Analiza regresji stosowana. PWN. Warszawa. 1973.
3. *Sokola-Szewiolo V.*: Jakościowe oraz ilościowe zależności pomiędzy sejsmicznością indukowaną i prędkościami obniżenia punktów obserwacyjnych na terenie górniczym. „Przegląd Górniczy” 2008, nr 11-12, s. 32-37.
4. *Sokola-Szewiolo V.*: Method of prediction the probability of a strong tremor on the basis of observed changes of mining ground subsidences. Archiwum Górnictwa. V.54. Issue 4, pp.725-737. ISBN 0860-7001, Wyd. PAN Kraków 2009.
5. *Sokola-Szewiolo V.*: Metoda prognozy wystąpienia wstrząsu górniczego na podstawie autoregresyjnego modelu zmian przemieszczeń pionowych. „Przegląd Górniczy” 2013, nr 8, s. 200-205.
6. *Sokola-Szewiolo V.*: Models of dependences between induced seismic activity and observed deformations of surface in the area of conducted longwall exploitation. Gospodarka Surowcami Mineralnymi. 2008, t. 24, z. 3/1, s. 159-172.