

Wiesław PIWOWARSKI

Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

DEFORMACJE POGÓRNICZE GENERUJĄCE PROCES NIECIĄGŁY

Streszczenie. W pracy przedstawiono rozważania dotyczące procesu deformacji terenu górniczego charakteryzującego się nieciągłymi przemieszczeniami. Zmiany struktury górotworu z jednego stanu w inny przechodzą tu przez destrukcję ośrodka. Analizę procesu ze względu na niejednoznaczność prowadzono w przestrzeni zmiennych losowych. Możliwe zajścia przedmiotowego zdarzenia zdefiniowano jako miarę probabilistyczną. Cel użyteczny to oszacowanie stanu zagrożenia terenu górniczego wystąpieniem nieciągłości o charakterze powierzchniowym lub w podobszarze wpływu eksploatacji podziemnej.

POST-MINING DEFORMATIONS GENERATING THE DISCONTINUOUS PROCESS

Summary. The present paper concerns the process of mining area deformation characterized by discontinuous dislocations. We can observe here the transformation of rock mass structure which changes from one state into another by means of medium destruction. By reason of ambiguity, the analysis of the process has been carried out in the space of random variables. The possible occurrence of the discussed event has been defined as probability measure. The practical aim of the study is to estimate the state of hazard to mining area caused by the possible appearance of discontinuity within the subregion of underground exploitation influence.

1. Charakterystyka procesu

Podziemna eksploatacja złoża prowadzona jest w polu sił generowanym przez stan górotworu. Stąd też wybieranie złoża generuje wiele niekorzystnych zjawisk w górotworze [5, 7]. Opis nieciągłego procesu deformacji – w sensie prognozy – przy użyciu modelu deterministycznego jest praktycznie niemożliwy. Wprawdzie proces przemieszczania się punktów ośrodka jest tu wymuszony głównie eksploatacją podziemną, jednak istotny wpływ mają inne czynniki, takie jak: budowa geologiczna, stan naprężeń itd. Czynniki tych nie

jesteśmy w stanie dokładnie określić. Ilustrację powstałej nieciągłości terenu górniczego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Deformacja nieciągła terenu górniczego na obszarze dawnej płytkiej eksploatacji
Fig. 1. Discontinuous deformation of mining terrain in the area of old shallow exploitation

Deformacjami ciągłymi objęta jest praktycznie cała powierzchnia terenów górniczych na Śląsku. Jednak szczególne zagrożenie terenu powstawaniem deformacji nieciągłych istnieje na obszarach dawnej płytkiej eksploatacji węgla kamiennego i innych surowców, zlokalizowanych na głębokości $50 \div 150$ m. Procesy nieciągłe terenu [5] pojawiają się w sposób gwałtowny, są wyjątkowo szkodliwe, charakteryzują się nieregularnym przebiegiem, powodują uszkodzenia budynków, obiektów przemysłowych, szlaków komunikacyjnych itp.

W Górnośląskim Zagłębiu Węglowym eksploatacja węgla kamiennego prowadzona jest od przeszło 200 lat. Skutkiem dokonanej eksploatacji są istotne zmiany środowiska naturalnego, w tym rozległe i nieodwracalne deformacje powierzchni terenu.

Wśród zagrożeń powodowanych przez działalność górniczą należy wymienić:

- ciągle deformacje górotworu – niecki pogórnice,
- deformacje nieciągłe o charakterze powierzchniowym (zapadliska) i liniowym (progi, uskoki, szczeliny, pęknięcia, rowy) [1, 2],
- powstawanie zalewisk, niecek bezodpływowych, zanieczyszczeń wód,
- przekształcenie krajobrazu i naturalnej rzeźby terenu.

Procesy zapadliskowe powodują charakterystyczne deformacje powierzchni, z reguły dochodzi do przerwania ciągłości warstw geologicznych oraz lokalnych nieciągłych obniżen

powierzchni terenu. W górotworze często indukują się procesy sufozji chemicznej oraz zjawiska krasowe.

Zjawiska niestabilne (osobliwe) najczęściej modeluje się jako procesy stochastyczne.

2. Sformułowanie problemu

Niech fragment górotworu poddany będzie oddziaływaniu eksploatacji podziemnej – rys. 2. W wyniku działania sił $|F_i|$ w otoczeniu dokonanej eksploatacji powstanie z reguły pole przemieszczeń.

O strukturach X_A , X_B , X_C mówimy, że są izomorficzne, jeżeli istnieje izomorfizm z X_A w X_B , i z X_B w X_C w znaczeniu przekształcenia lub *relacji równoważności*.

Procesy deformacyjne górotworu o współrzędnych stanu będących binarnymi funkcjami czasu są formalnie procesami nieciągłymi. Transformacja jednego stanu w inny przechodzi tu przez destrukcję ośrodka.

Przez stabilność ośrodka można rozumieć funkcjonal mikrostruktury a_i , makrostruktury b_i oraz czynników destrukcyjnych γ_i [3]:

$$S = \mathfrak{F}(a_i, b_i, \gamma_i),$$

Modele matematyczne to:

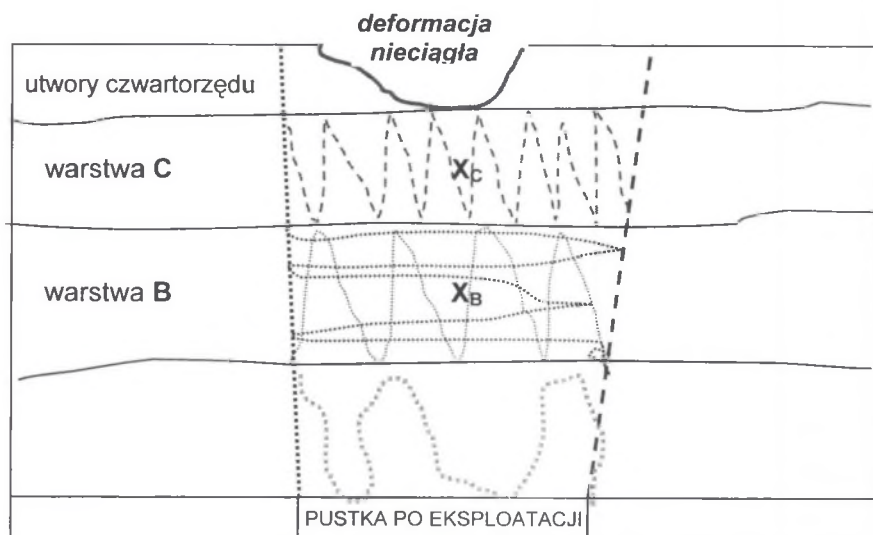
- *tabele funkcji logicznych,*
- *równania boolowskie,*
- *opisy losowe,*
- *wykresy czasowe.*

Rozważany problem obejmować będzie wstępną analizę generowania procesu deformacji nieciągłych jako procesu:

- *niezależnego od czasu,*
- *zależnego od czasu.*

Niezależność od czasu zakłada, że wielkości wpływające na stan procesu (obciążenia, parametry wytrzymałościowe warstw, wstrząsy górotworu), które wymuszają zajście analizowanego procesu, są reprezentowane przez n -wymiarową *zmienną losową*.

Zależność od czasu przyjmuje, że wielkości generujące stan procesu i funkcja gęstości prawdopodobieństwa zależą od czasu. Celem jest tu oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia (deformacji nieciągłej) w przedziale np. $[0, t]$.



Rys. 2. Fragment górotworu, w którym wystąpiła nieciągłość procesu przemieszczeń
Fig. 2. Fragment of rock mass where occurred discontinuity of displacement process

3. Analiza problemu

Główne przyczyny indukowania deformacji nieciągłych to:

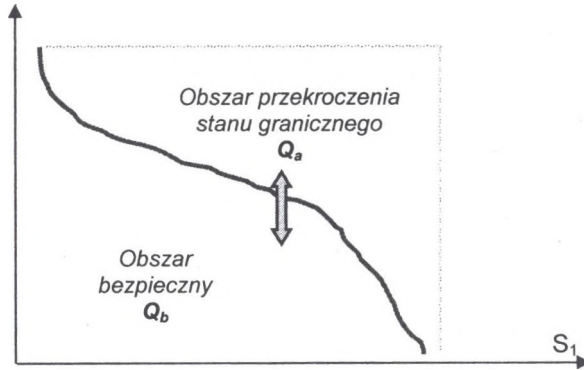
- eksploatacja płytko zalegających złóż z zawalem stropu,
- reaktywacja płytko zalegających starych zrobów,
- aktywacja niewłaściwie zlikwidowanych lub niezlikwidowanych szybków, komór itd.

Czynnikiem inicjującym procesy nieciągłe w otoczeniu dawnej płytkiej eksploatacji jest również zawodnienie górotworu. Przepływy wody w warstwach podpowierzchniowych wywołują istotne nieciągłości ośrodka, w efekcie powodując przemieszczanie się zniszczonej struktury górotworu w kierunku pustki poeksploatacyjnej.

Przedstawiony na rys. 1 schemat generowania deformacji nieciągłej składa się ze skończonej liczby elementów, które mogą ulec zniszczeniu. Każdy element (warstwa) może znajdować się w stanie nieuszkodzonym lub zniszczonym. Stan danego elementu

identyfikowany jest na podstawie funkcji granicznej. Przez łączenie elementów definiuje się stan procesu.

Uszkodzenie każdej warstwy górotworu następuje, jeżeli przekroczony zostanie stan graniczny [3, 10].



Rys. 3. Ilustracja stanów granicznych warstwy górotworu w polu przemieszczeń
Fig. 3. Limiting state of rock mass layer in the displacement field

Idea powstania deformacji nieciągłej terenu górnego:

- w wyniku siły ciężenia i ubytku masy w złożu (pustka poeksploatacyjna) następuje zniszczenie ciągłości struktury warstwy **A** i przemieszczenie się części masy ośrodka w kierunku pustki poeksploatacyjnej,
- powstała w wyniku przemieszczeń masy z warstwy **A** pustka jest zapełniana (wskutek sił ciężenia) masą z warstwy **B**, implikując pustkę w warstwie **B**.

Podobny mechanizm fizyczny zachodzi w warstwie **C**.

Proces zniszczenia części kolejnych części warstw górotworu dochodzi do utworów czwartorzędowych, które odznaczają się wyjątkowo słabą wytrzymałością, co powoduje często gwałtowne przemieszczanie się masy utworu czwartorzędowego, implikując nieciągły proces przemieszczeń warstwy powierzchniowej.

Jak już zaznaczono, zniszczenie ciągłości struktury kolejnych warstw górotworu wynika z przekroczenia stanów granicznych ich wytrzymałości.

W celu wyznaczenia stanu granicznego przyjmuje się następującą formułę [3]:

$$\left. \begin{aligned} \Omega_a &= \{x : f(x) = 0\} \\ P(X \in \Omega_a) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Ponieważ ściśle wyznaczenie stanów granicznych odporności jest praktycznie niemożliwe, więc dalsza część rozważań przeprowadzona będzie w ujęciu stochastycznym.

Zauważmy, że proces finalny (deformacja nieciągła) zachodzi po zniszczeniu struktury wszystkich warstw powyżej eksploatowanego pokładu. Ugięcie części warstw rozważanego ośrodka nie powoduje procesów osobliwych.

Zgodnie z rys. 3 można więc wyróżnić dwa stany w przestrzeni zmiennych losowych:

- stan bezpieczny:

$$\Omega_b = \{x : f(x) > .0\}, \quad (2)$$

- stan zajścia zdarzenia (wystąpienie deformacji nieciągłej):

$$\Omega_a = \{x : f(x) \leq .0\}, \quad (3)$$

gdzie $f(x)$ – odporność na zniszczenie struktury części warstwy górotworu.

Obszar zniszczenia pierwotnej struktury warstw wyznacza się tu następująco:

$$\Theta_a^P = \bigcup_{i=1}^n \Theta_{a_i}, \quad (4)$$

gdzie Θ_{a_i} – warstwy o zniszczonej strukturze w wyniku oddziaływania eksploatacji.

Istotna zmiana pierwotnej struktury warstwy górotworu zależy od *obciążenia* konkretnej warstwy i od *zmienności parametrów* wytrzymałościowych danej warstwy. Metody deterministyczne są tu praktycznie niewystarczające.

Niech (Ω, Σ, P) będzie przestrzenią probabilistyczną,

gdzie Ω – przestrzeń zdarzeń elementarnych,

Σ – σ algebra podzbiorów Ω ,

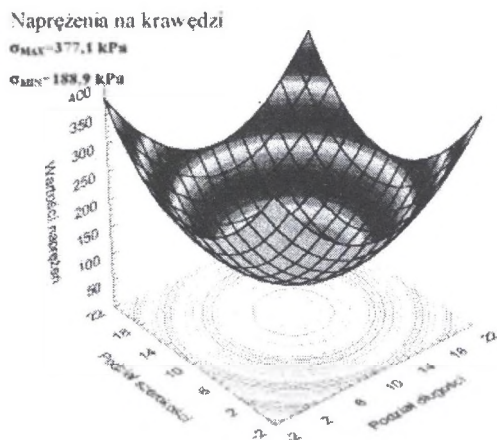
P – miara probabilistyczna.

Z formalnej analizy rozważanego procesu wynika, że zajście X_B wynika z zajścia zdarzenia X_A itd. Mamy więc:

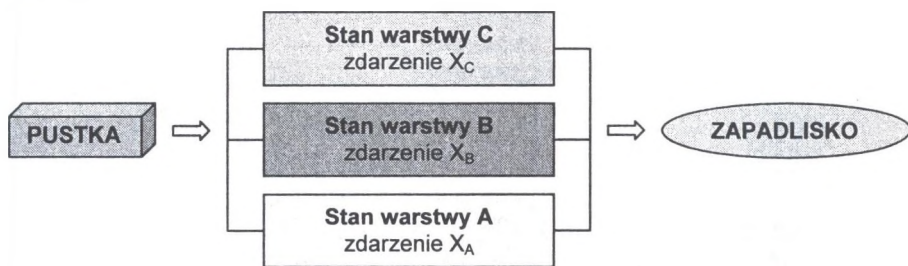
$$P(X_B | X_A) = \frac{P(X_B \cap X_A)}{P(X_A)}, \quad (5)$$

przy czym:

$$P(X_B \cap X_A) \leq P(X_A). \quad (6)$$



Rys. 4. Rozkład naprężeń osiowego nad pustką poeksploatacyjną
Fig. 4. Stress distribution above the after mining void



Rys. 5. Schemat ideowy generowania deformacji nieciągłej
Fig. 5. Schematic diagram of generating discontinuous deformation

Jeżeli:

$$P(X_A \cap P(X_B)) > 0, \quad (7)$$

to zachodzi:

$$P(X_C | X_A \cap X_B) = \frac{P(X_A \cap X_B \cap X_C)}{P(X_A \cap X_B)}, \quad (8)$$

gdzie $P(X_A, \dots)$ – miara probabilistyczna.

Zmienna losowa (przykładowo) X_A z reguły ma skończenie wiele wartości:

$$X_A : \{x_1, x_2, \dots, x_n\}.$$

Wartość oczekiwana zmiennej losowej X_A [2,6] wynosi:

$$EX_A = \sum_{i=1}^n x_i P(X_A = x_i). \quad (9)$$

Wprowadzając zdarzenie X_B , takie że $P(X_B) > 0$, wyznaczmy wartość oczekiwaną zdarzenia X_B pod warunkiem, że zaszło zdarzenie X_A :

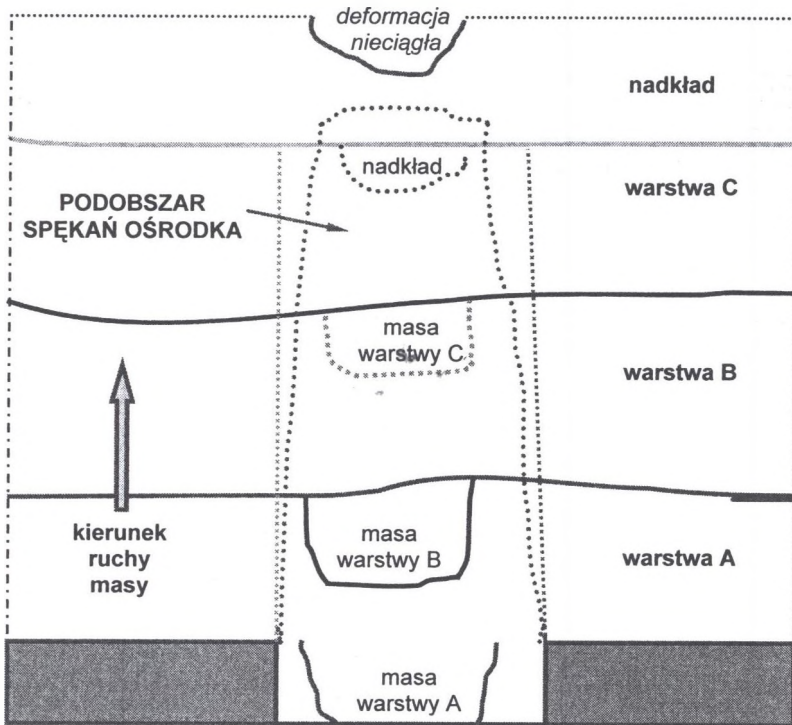
$$E(X_B | X_A) = \sum_{i=1}^n x_i P(X_A = x_i | X_A). \quad (10)$$

Prawdopodobieństwo wystąpienia deformacji nieciągłej na powierzchni terenu górniczego można więc wyrazić następująco:

$$P(Q_a) = P\left(\bigcap_{i=1}^n Q_{a_i}\right) = P\left(\bigcap_{i=1}^n (f_i(X) \leq 0)\right), \quad (11)$$

gdzie: $f_i(X)$ – funkcje graniczne zniszczenia struktury i -tej warstwy.

4. Szacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia deformacji nieciągłej



Rys. 6. Schemat ideowy przemieszczania się masy wewnątrz górotworu, ilustrujący powstanie zapadliska na powierzchni terenu

Fig. 6. Schematic diagram of rock mass displacements illustrating collapse formation on the land surface

Zauważmy, że ilość zdarzeń zajścia zdarzenia (wystąpienia deformacji nieciągłej) na poszczególnych horyzontach (rys. 6) nie jest znana, przypisanie zaś prawdopodobieństw jest opisem pewnego stanu wiedzy. Wielkością, którą można oszacować, jest prawdopodobieństwo wystąpienia nieciągłości na powierzchni terenu. Przedstawiono ją w [1, 10].

Niech Γ w prezentowanej teorii oznacza pewne obserwowane zdarzenie, natomiast $\{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ oznacza zbiór możliwych przyczyn zajścia zdarzenia Γ . Jeżeli na podstawie modelu określimy prawdopodobieństwa wystąpienia każdego zdarzenia, tj.:

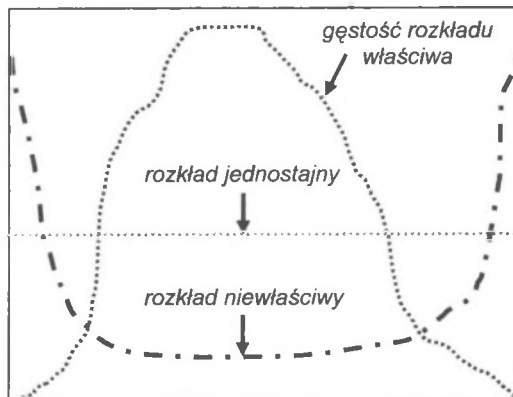
$$P(\Gamma) = P(\Gamma|C_i) \quad (i=1,2,\dots,N), \quad (12)$$

to wówczas prawdopodobieństwa przyczyn C_i przy jednorodnym rozkładzie początkowych prawdopodobieństw, korzystając z [2], wynoszą:

$$P(C_i|\Gamma) = \frac{P(\Gamma|C_i)}{\sum_{j=1}^N P(\Gamma|C_j)}. \quad (13)$$

Istotne byłoby rozwiązanie pozwalające określić reguły generowania analizowanego procesu (gry losowej) na podstawie obserwacji wyników badanego zjawiska. Ścisłej odpowiedzi na tak sformułowany problem nie ma. Spotykane rozwiązania wykorzystują twierdzenie Laplace'a – Bayesa [8] i reguły indukcyjne do wnioskowania [9]. Generalnie problem sprowadza się do włączania poszerzonej wiedzy w danym zakresie i ustawienia zdobytej wiedzy według relacji przechodniości.

Wiarygodność zdobytej wiedzy dotyczącej zajścia analizowanego zdarzenia ilustruje rys. 7.



Rys. 7. Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa „charakteryzujące” proces
Fig. 7. Distributions of probability density characterizing process

Przedstawione rozkłady opisują stan naszej wiedzy o danym procesie przed eksperymentem. Eksperyment pozwala zweryfikować model procesu.

Część masy przemieszcza się tu po danej powierzchni, aby przejść od jednego podobszaru do drugiego, a przemieszczając się, „obiera” linię geodezyjną, czyli drogę najkrótszą. W sensie ideowym przyczyny celowe nie powinny tu być nadrzędne względem przyczyn sprawczych. Ponieważ przyczyny, które poprzedzają fakt przemieszczania się części masy górotworu, prawdopodobnie nigdy się dokładnie nie powtarzają, więc przewidywanie powtórzenia tego faktu, przy najmniejszej choćby zmianie tych okoliczności, praktycznie wyklucza stosowanie metod deterministycznych do opisu nieciągłości deformacji ośrodka.

Można przyjąć, że istnieje kilka nierozróżnialnych sposobów przemieszczania się masy górotworu ze stanu wyjściowego do stanu końcowego. Jeżeli drogi przejścia są fizycznie nieodróżnialne, oznacza to, iż nie można ustalić szczegółów przebiegu tego procesu. Jeżeli potrafimy oszacować prawdopodobieństwo przejścia do dowolnego z tych stanów, to prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia jest sumą prawdopodobieństw przejść do różnych stanów pośrednich.

Obszar wystąpienia nieciągłości terenu górniczego w sensie stabilności struktury warstw górotworu wskazuje, że jeżeli nastąpiło zniszczenie struktury kilku podobszarów górotworu, z których zbudowany jest dany ośrodek, to wówczas podobszar generowania zapadliska można określić następująco:

$$\Omega_z = \bigcap_{i=1}^m \Omega_{z_i}, \quad (14)$$

gdzie Ω_{z_i} – podobszary zniszczenia pierwotnej struktury ośrodka.

Prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia (nieciągłości) na powierzchni można tu wyrazić następująco, korzystając z [14]:

$$P[\Omega_z] = P\left[\bigcap_{i=1}^m \{\Omega_{z_i}\}\right], \quad (15)$$

gdzie $f_i(X)$ – funkcje graniczne zniszczenia struktury i -tej warstwy.

Zauważmy, że określając prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia (nieciągłości), korzystano z formuły na prawdopodobieństwo warunkowe. W celu sekwencji zdarzeń na granicy poszczególnych warstw, posłużono się modelem Bayesa, dokonując przeliczalnego rozbicia przestrzeni zdarzeń elementarnych, przypisując aprioryczne prawdopodobieństwa.

Reguła Bayesa nie wskazuje jak te prawdopodobieństwa określić. Z reguły mamy zbyt mało danych eksperymentalnych, więc konwencjonalne podejście statystyczne jest mało użyteczne. Jednym z możliwych rozwiązań jest zdefiniowanie gładkiej funkcji rozkładu gęstości i określenie prawdopodobieństwa. Następnie należy oszacować prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia i zweryfikować je na podstawie danych eksperymentalnych. Z reguły funkcja gęstości nie jest gładka i przyjęcie jej zawęża przestrzeń rozwiązań. Metodą kolejnych przybliżeń można uzyskać quasi-rozwiązanie.

5. Podsumowanie

Rozważania dotyczą analizy procesu deformacji terenu górnicego, charakteryzującego się nieciągłymi realizacjami przemieszczeń. Procesy deformacyjne ośrodka o współrzędnych stanu będących binarnymi funkcjami czasu są formalnie procesami nieciągłymi. Transformacja jednego stanu w inny przechodzi tu przez destrukcję ośrodka. Są to wyjątkowo szkodliwe procesy, charakteryzujące się nieregularnym przebiegiem. Analizę formalną procesu prowadzono w przestrzeni zmiennych losowych, wyróżniając:

- *stan bezpieczny*,
- *stan zajścia zdarzenia* (wystąpienie deformacji nieciągłej).

Zniszczenie ciągłości struktury kolejnych warstw górotworu wynika z przekroczenia stanów granicznych ich wytrzymałości.

Wyniki pomiarów geodezyjnych, stanowiące odwzorowanie *quasi-ruchów* punktów powierzchni, nie pozwalają w pełni oszacować zagrożenia terenu w obszarze oddziaływania eksploatacji podziemnej. Naturalną implikacją było tu opracowanie metodyki oceny stanu zagrożenia terenu. Wyznaczone interwały próbkowania charakterystycznych wskaźników procesu pozwalają zminimalizować stratę informacji.

Cel utylitarny to wyznaczenie prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia (nieciągłości) w wieloparametrowym obszarze deformacji terenu, tak by indywidualnie określić stan zagrożenia.

BIBLIOGRAFIA

1. Chudek M.: Geomechanika z podstawami ochrony środowiska górnicego i powierzchniowego. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.

2. Chudek M., Waclaw J., Zych J.: Studium dotyczące stanu rozpoznawania tworzenia się i prognozowania deformacji nieciągłych pod wpływem podziemnej eksploatacji złóż. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 141, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1988.
3. Ditlevsen O., Madsen H. O.: Structural Reliability Methods. Wiley 1996.
4. Papoulis A.: Prawdopodobieństwo, zmienne losowe i procesy stochastyczne. WNT, Warszawa 1972.
5. Pilecki Z., Popiołek E.: Wpływ eksploatacji rud na zagrożenie powierzchni deformacjami nieciągłymi i jego badanie za pomocą metod geofizycznych. PAN, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Kraków 2000.
6. Piwowarski W.: Szacowanie ryzyka powstania szkody górniczej. Przegląd Górniczy, Katowice 2006.
7. Piwowarski W.: The Analysis of the Process of Dislocations of Surface Points within the Area of Inactive Mines. Fuxin-Beijing, China 2004.
8. Rosenblatt M.: Procesy stochastyczne. PWN, Warszawa 1967.
9. Schwartz L.: Kurs analizy matematycznej. T. 1, 2. Warszawa 1979 – 1980.
10. Wegner T.: Metody energetyczne w wytrzymałości materiałów. Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. dr h.c. Mirosław CHUDEK

Abstract

Underground mining leads to changes in some natural environment elements: rock mass, atmosphere and hydrosphere. Rock mass changes concern with continuous deformations (subsidence troughs) that occur in every case of underground mining – and discontinuous deformations connected with liquidation of extracted shallow parts of deposit. The process of self-filling of these working may cause sinks occurrence on the surface. These sinks are important issue to safety of buildings.

The presented paper concerns the process of mining area deformation characterized by discontinuous dislocations. We can observe here the transformation of rock mass structure which changes from one state into another by means of medium destruction. By reason of ambiguity, the analysis of the process has been carried out in the space of random variables. The possible occurrence of the discussed event has been defined as probability measure. The practical aim of the study is to estimate the state of hazard to mining area caused by the possible appearance of discontinuity within the subregion of underground exploitation influence.