ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: GÓRNICTWO z. 254 Nr kol. 1563

Danuta KACZOR
Uniwersytet Śląski, Sosnowiec

MONITORING NIECKI OSIADANIA POMIARAMI ELEKTROOPOROWYMI

Streszczenie. Wpływ eksploatacji górniczej na środowisko jest jednym z ważniejszych zagadnień górnictwa. W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów elektrooporowych wykonanych w celu zbadania przebiegu zmian własności elektrycznych przypowierzchniowych warstw górotworu podczas kształtowania się niecki osiadania. Omówiono wyniki pomiarów elektrooporowych w kontekście deformacji górotworu wywołanej eksploatacją oraz przedstawiono model procesu deformacji. Wydaje się, że tak przeprowadzone badania stanowią kolejne źródło informacji o procesie deformacji przypowierzchniowych warstw górotworu, co może mieć istotne znaczenie dla oceny wpływu danej eksploatacji na środowisko.

MONITORING OF SURFACE SUBSIDENCE BY THE RESISTIVITY METHOD

Summary. One of the most important problem of mining is the influence of underground mining on the natural environment. In the article the author present the results of geoelectrical measurements which were made to research temporal variations of electrical features subsurface rock layers during the process of surface subsidence. These results were discussed in the contest of the deformations of rock mass layers induced by mining exploration and the model of the process of deformation was shown, too. It seems that so prepared studies are next source of information about the progression of deformation of rock mass layers which can have significant role in the estimation of influence of the given exploitation on the environment.

1. Wprowadzenie

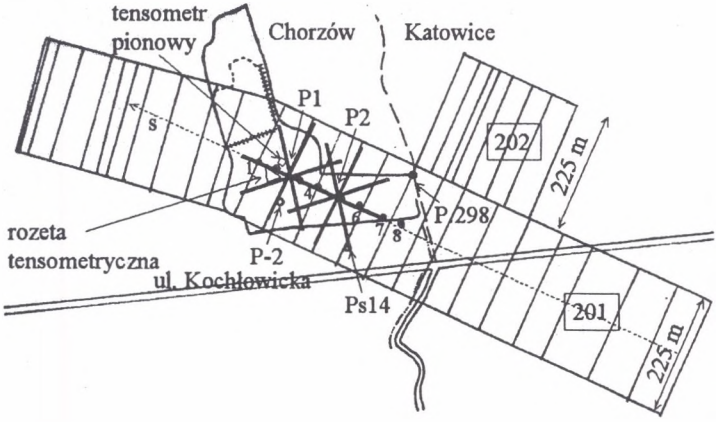
Od lat sześćdziesiątych XX wieku zaczęto wykorzystywać metodę elektrooporową do prognozowania zagrożeń wstrząsem górniczym w kopalniach [1, 2, 3, 4] i do oceny strefy

spękań w otoczeniu wyrobisk [5, 6]. Na podstawie pomiarów elektrooporowych określono również miejsce i czas wystąpienia zawału w fazie rozruchu ściany zawałowej [7] zwiększając tym bezpieczeństwo pracy górników. Ponadto prowadzono szereg badań laboratoryjnych na próbkach skalnych w celu powiązania zmian oporu elektrycznego z działającymi naprężeniami oraz w celu określania zmian właściwości mechanicznych skał wywołanych obciążeniem. Tego typu prace dostarczyły informacji o deformacjach i pęknięciach powstających w próbce w wyniku obciążenia. Pozwoliły one opisać jakościowo relacje pomiędzy naprężeniem a oporem skały [4, 8, 9], podać zależności między naprężeniem a odkształceniem podłużnym i poprzecznym próbki, wartości ich ściśliwości, wartości dynamicznych stałych sprężystości, itp. [10, 11, 12]. Elektrooporowe badania laboratoryjne na próbkach skał prowadzili również Stopiński, Sobolew, Ponomariew, Łoś [13]. W wyniku przeprowadzonych przez nich eksperymentów na specjalnie przygotowanych próbkach skalnych poddanych znanemu obciążeniu stwierdzili, że skokowe przyrosty oporności są wskazówką formowania się, w wyznaczonej strefie zniszczenia, głównego rozrywu (szczeliny). Z kolei wśród wielu prac eksperymentalnych na temat anizotropowego zachowania się skał poddanych obciążeniom należy zwrócić uwagę na prace Kwaśniewskiego oraz Mogiego [14], którzy m.in. pokazali, że przebieg anizotropii wywołany zewnętrznym obciążeniem odzwierciedla geometrię procesu deformacji skały.

Stosunkowo niewiele jest opracowań dotyczących oceny zachowania górotworu w strefie pomiędzy eksploatowanym pokładem węgla a powierzchnią górotworu podczas prowadzenia eksploatacji. W związku z tym podjęte zostały badania tego obszaru przy wykorzystaniu metody elektrooporowej. Ponieważ w trakcie prowadzonej eksploatacji ścianowej warstwy górotworu ulegają deformacji, a deformacje te powodują zmiany własności elektrycznych warstw, przyjęto założenie, że czasowe pomiary oporu metodą sondowania pozwolą opisać proces deformacji warstw przypowierzchniowych. W tym celu pomiary wykonane zostały na obszarze kopalni „Katowice-Kleofas" Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Badania prowadzone były w dwóch punktach pomiarowych na powierzchni terenu znajdującego się nad eksploatowaną ścianą węgla przez okres ok. 2 lat. W każdym punkcie stosowano azymutalne rozstawy układu pomiarowego. Dzięki takiej konfiguracji uchwycono zmiany własności elektrycznych warstw górotworu i powiązano je z przemieszczającym się frontem eksploatacji oraz wyznaczono anizotropię oporu warstw skalnych.

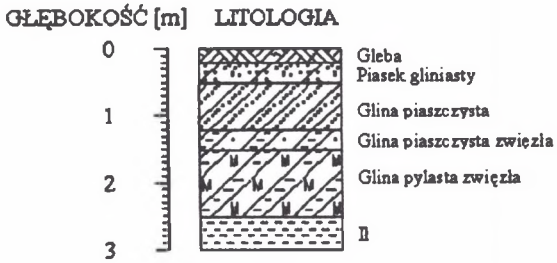
2. Teren badań – charakterystyka geologiczna

Na terenie polany leśnej leżącej na obrzeżach Chorzowa przy ul. Kochłowickiej wykonywano powierzchniowe pomiary elektrooporowe, tensometryczne oraz geodezyjne obejmujące zasięgiem górne warstwy górotworu (rys. 1). Obszar ten należy do południowego skłonu Siodła Głównego centralnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Powierzchnia terenu zapada lekko na północ w kierunku doliny rzeki Rawy, natomiast pokłady węgla zalegają wzdłuż kierunku wschód–zachód i zapadają pod kątem 6° na południe. Uskoki o zrzucie do kilku metrów występują w środkowej i zachodniej części ściany 201, a o zrzucie kilku metrów w obrębie ściany 202. Pod powierzchnią polany prowadzona była eksploatacja węgla w pokładzie 510 ścianą 201 oraz na północ od ściany 201, ścianą 202. Eksploatacja prowadzona na zawał przebiegała na głębokości średnio 650 m ppt. Ścianę 201 eksploatowano od stycznia 1999 r. do lutego 2001 r., natomiast ścianę 202 od lipca 2000 r. do lutego 2001 r. Długość ściany 201 wynosiła 225 m, a wybieg około 1300 m, natomiast ściany 202, odpowiednio 225 m i 225 m. Miąższość pokładu 510 w tym rejonie wynosi ok. 6 m. W obu ścianach wybierano warstwę węgla o miąższości ok. 2 m. W rejonie badań nad pokładem 510 wyeksploatowano 6 udokumentowanych pokładów.



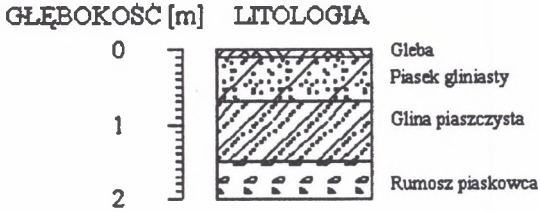
Rys. 1. Teren pomiarów, lokalizacja punktów pomiaru oporu P1 i P2 oraz punktów niwelacyjnych od 1 do 8. Opis w tekście
Fig. 1. Site of measurements, localization of the resistivity measurements points P1 and P2 and the bench marks from 1 to 8. Description in the paper

W odległości pół metra od punktu pomiarowego P1 (2001r.) został odwiercony otwór o głębokości 3 m. Na rysunku 2 przedstawiony jest profil geologiczny tego otworu.



Rys. 2. Profil geologiczny w pobliżu punktu pomiarowego P1 wg Rafała Nizickiego [15] w ramach prowadzonych badań
Fig. 2. The geological profile near the measurements points P1 made by Rafał Nizicki within the confines of the research in 2001

Natomiast w odległości pół metra od punktu pomiarowego P2 (2001r.) został odwiercony otwór do głębokości 1,5 m (rys. 3).



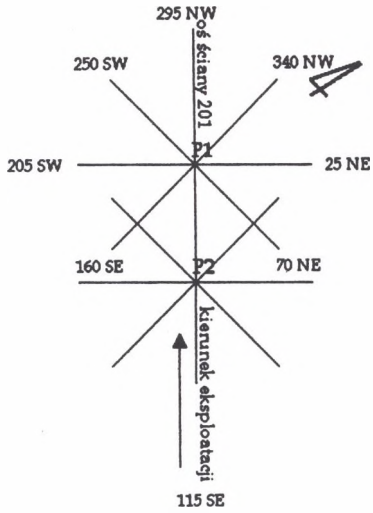
Rys. 3. Profil geologiczny w pobliżu punktu pomiarowego P2 wg Rafała Nizickiego [15] w ramach prowadzonych badań
Fig. 3. The geological profile near the measurements points P1 made by Rafał Nizicki within the confines of the research in 2001

Dodatkowo z istniejących otworów piezometrycznego P-2 (1991 r.) oraz wiertniczego P.298 (1957 r.) uzyskano następujący profil litostratygraficzny: nadkład stanowią skały czwartorzędu, a zaraz pod nimi zalegają skały karbonu produktywnego (warstwy orzeskie, warstwy rudzkie). Miąższość czwartorzędu jest bardzo zmienna, ale ogólnie zwiększa się na północ. W otworze piezometrycznym P-2 miąższość czwartorzędu wynosi ok. 5 m, natomiast w otworze wiertniczym P.298 ok. 8,5 m.

3. Lokalizacja punktów pomiarowych, metodyka pomiarów elektrooporowych

Na terenie polany została wytyczona linia s równoległa do osi eksploatowanej ściany 201 (rys. 1). Na linii s wyznaczono dwa punkty pomiaru oporu oznaczone odpowiednio P1 i P2. Front eksploatacji ściany 201 przechodził najpierw pod punktem P2. W obu punktach

wykonywano sondowania oporu rozstawem symetrycznym Schlumbergera w czterech różnych kierunkach: równoległym (295 NW), prostopadłym (205 SW) i pod kątem (±) 45° (odpowiednio 250 SW i 160 SE) względem osi ściany 201 (rys. 4).



Rys. 4. Orientacja profili pomiarowychw punktach P1 i P2 względem osi ściany 201
Fig. 4. The localization of measurements profiles in the points P1 and P2 with respect to the axis of the long wall No 201

W pojedynczym sondowaniu stosowano następujące rozstawy AB = 6 m, 8 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, oraz od 60 m do 200 m z krokiem 20 m (razem 16 rozstawów). W okresie od 15 września 1999 r. do 1 maja 2001 r. wykonano 28 pomiarów w punkcie P1 oraz 28 pomiarów w punkcie P2.

4. Analiza i interpretacja wyników pomiarów

Zastosowanie metody sondowań oporu do badania procesu deformacji przypowierzchniowych warstw górotworu wywołanego podziemną eksploatacją górniczą wymagało opracowania metody analizy zarejestrowanych obserwacji. Ostatecznie, czasowe zmiany wartości oporu pozornego dla kolejnych rozstawów elektrod prądowych przeanalizowano za pomocą współczynnika pseudoanizotropii [16]. Współczynnik ten pozwolił uwzględnić jednocześnie wyniki obserwacji otrzymane z różnych kierunków pomiarowych oraz pozwolił ocenić anizotropię oporu pozornego w rozważanym masywie

skalnym. Na podstawie zmian wartości współczynników pseudoanizotropii oporu pozornego oraz przebiegu krzywych osiadań punktów niwelacyjnych i miesięcznego postępu ścianowego opracowany został model procesu deformacji przypowierzchniowych warstw górotworu wywołanego przemieszczającym się frontem eksploatacji. Kierunkowe zmiany wartości oporów pozornych zanalizowano również za pomocą rachunku tensorowego, ponieważ w przeprowadzonych badaniach wyznaczono tensor odkształcenia, co pozwoliło na porównanie zachodzących zmian obu wielkości. W niniejszym artykule model procesu deformacji przedstawiony został na podstawie zmian wartości współczynnika anizotropii tensora oporu pozornego drugiego rzędu (w ujęciu płaskim). W celu wyznaczenia tensora oporu pozornego wartości oporów pozornych uszeregowano względem kierunku pomiaru dla każdego dnia pomiarowego. Do tak otrzymanych punktów metodą iteracyjną Levenberga-Marquardta dopasowano równanie elipsy (w płaszczyźnie poziomej główne osie elipsy wyznaczają kierunki własne tensora drugiego rzędu). Błąd dopasowania (chi kwadrat) równania elipsy do punktów pomiarowych jest rzędu $10^{-6} \div 10^{-12}$. Natomiast maksymalny błąd względny oszacowania parametrów elipsy, czyli współczynników tensora, wynosi 0,01%. Za pomocą tych współczynników wyliczono wartości własne tensora oporu pozornego. Z wartości własnych tensora obliczono współczynniki anizotropii. W tabeli 1 przedstawiono wartości współczynników korelacji pomiędzy wartościami współczynników pseudoanizotropii oporu pozornego K i współczynnika anizotropii tensora oporu pozornego K'.

Współczynniki korelacji oscylują wokół wartości 0.9. W takim razie przebiegi wartości własnych tensorów oporu pozornego zgodne są z przebiegami rzeczywistych wyników pomiaru. Stąd na ich podstawie można również zaprezentować model procesu deformacji. Ze względu na obszerność materiału pomiarowego oraz interpretacyjnego ograniczono się do kilku przykładowych wykresów. Poniższe rysunki (5) oraz (6) prezentują zmiany wartości współczynnika anizotropii tensora oporu pozornego dla trzech kolejnych rozstawów elektrod prądowych w punkcie pomiarowym P1 oraz P2 z zaznaczonymi etapami modelu procesu deformacji opisanymi w następnym rozdziale.

Tabela 1

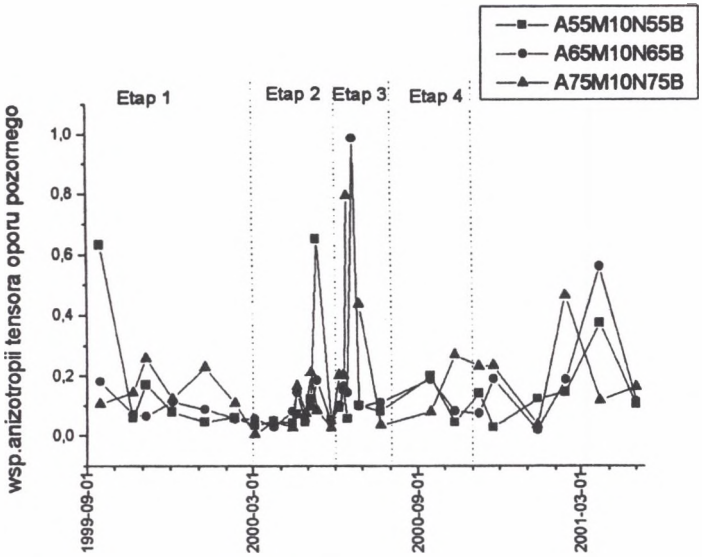
Wartości współczynników korelacji pomiędzy: K – współczynnikiem pseudoanizotropii oporu pozornego a K' – współczynnikiem anizotropii tensora oporu pozornego

AB/2 [m]	*K* a *K'* dla P1	*K* a *K'* dla P2
3	0,71	0,91
4	0,88	0,98
5	0,93	0,90
7.5	0,96	0,97
10	0,95	0,93
15	0,92	0,72
20	0,62	0,90
25	0,99	0,99
30	0,91	0,99
40	0,89	0,92
50	0,73	0,94
60	0,70	0,97
70	0,98	0,94
80	0,89	0,86
90	0,83	0,78
100	0,92	0,87

5. Model procesu deformacji przypowierzchniowych warstw górotworu

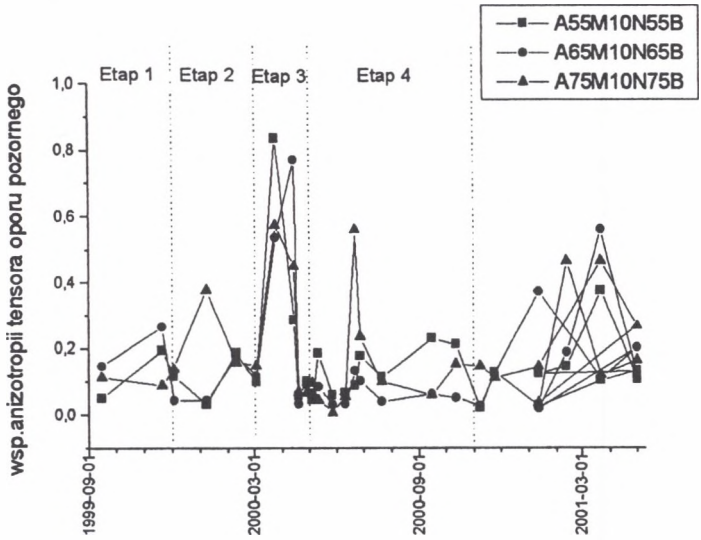
Mechanizm oddziaływania przemieszczającego się frontu eksploatacji na przypowierzchniowe warstwy górotworu, znajdujące się nad eksploatowaną ścianą, podzielono na cztery etapy:

- **Etap 1.** Stan wyjściowy. Front eksploatacji znajduje się daleko od punktów pomiaru oporu. Przypowierzchniowe warstwy górotworu charakteryzują się losowym rozkładem szczelin oraz pęknięć, o czym świadczy względnie niska wartość współczynnika anizotropii tensora oporu pozornego.
- **Etap 2.** W obszar pomiarowy dochodzą wpływy zbliżającego się frontu eksploatacji. Działają już:
  - równolegle do kierunku eksploatacji naprężenia rozciągające, w wyniku których powstają pęknięcia oraz szczeliny o biegu prostopadłym do kierunku eksploatacji,
  - prostopadle do kierunku eksploatacji naprężenia ściskające, w wyniku których zamykane są istniejące pęknięcia, szczeliny o biegu równoległym do kierunku eksploatacji, dochodzi do lokalnego zaciskania pomiędzy elementami struktur.



Rys. 5. Zmiany w czasie wartości współczynnika anizotropii tensora oporu pozornego dla wybranych rozstawów układu pomiarowego $Al_1Ml_2Nl_1B$ w punkcie P1. l_1 – odległość pomiędzy elektrodami AM oraz NB, l_2 – odległość pomiędzy elektrodami potencjałowymi

Fig. 5. Variability of the anisotropy coefficient of the of the apparent resistivity tensor for chosen spread of measurements layout $Al_1Ml_2Nl_1B$ in the point P1. l_1 – the distance between AM and NB electrodes, l_2 – the distance between potential electrodes



Rys. 6. Zmiany w czasie wartości współczynnika anizotropii tensora oporu pozornego dla wybranych rozstawów układu pomiarowego $Al_1Ml_2Nl_1B$ w punkcie P2. l_1 – odległość pomiędzy elektrodami AM oraz NB, l_2 – odległość pomiędzy elektrodami potencjałowymi

Fig. 6. Variability of the anisotropy coefficient of the of the apparent resistivity tensor for chosen spread of measurements layout $Al_1Ml_2Nl_1B$ in the point P2. l_1 – the distance between AM and NB electrodes, l_2 – the distance between potential electrodes

W efekcie pojawiają się skokowe oscylacje wartości współczynnika anizotropii tensora oporu pozornego.

- **Etap 3.** Front eksploatacji przechodzi pod punktami pomiarowymi. Gdy do obszarów górotworu objętego pomiarami elektrooporowymi dochodzą maksymalne naprężenia rozciągające i ściskające, ośrodek skalny prawdopodobnie ulega mocnemu spękaniu, szczeliny o biegu prostopadłym do kierunku eksploatacji zostają połączone, natomiast o biegu równoległym zaciśnięte. Po przejściu frontu obszary pomiarowe górotworu poddane zostają naprężeniom ściskającym. W rezultacie zmniejsza się nasycenie szczelin wodą. Świadczy o tym maksymalna anizotropia w rozkładzie oporu pozornego zarejestrowana pod koniec tego etapu. Szczególnie wyraźna przy dużych rozstawach elektrod prądowych.
- **Etap 4.** Stan końcowy. Front eksploatacji znajduje się daleko za punktami pomiarowymi. Naprężenia i rozprężenia w ośrodku relaksują się. W porównaniu ze stanem wyjściowym, istnieją ukierunkowane koncentracje spękań. Wartości współczynnika stabilizują się na poziomie nieco wyższym od poziomu z początków pomiaru.

6. Wnioski

- Przemieszczanie się frontu eksploatacji wywołało zmiany wartości oporu pozornego oraz odkształcenia w przypowierzchniowych warstwach górotworu.
- Na podstawie zaobserwowanych zmian wartości oporu pozornego można było zaproponować mechanizm oddziaływania podziemnej eksploatacji na przypowierzchniowe warstwy górotworu.
- Wyróżnione etapy zmian wartości oporu pozornego w obu punktach pomiarowych występują w różnym czasie. W punkcie P2 znajdującym się w pierwszej kolejności w zasięgu działania frontu eksploatacji występują wcześniej, natomiast w punkcie P1 później.
- Drugi oraz trzeci etap modelu procesu deformacji w obu punktach charakteryzuje się tym samym czasem trwania, co jeszcze bardziej przekonuje do powiązania tych zmian z przemieszczającym się frontem eksploatacji. Natomiast różnice w długości trwania pierwszych etapów wynikają z rozpoczęcia cyklu pomiarów w momencie, gdy punkt P2 znajdował się już w zasięgu wpływów eksploatacji ściany 201. Z kolei czas trwania

czwartych etapów najprawdopodobniej został zaburzony wpływami pochodzącymi z rozpoczęcia eksploatacji ściany 202.

- Ponieważ etapy drugi i trzeci modelu procesu deformacji charakteryzują się tą samą długością trwania (tu odpowiednio 3 i 2 miesiące) i w punkcie P2 występują wcześniej, natomiast w punkcie P1 później, to można powiedzieć, że na ich podstawie da się określić czas trwania największych deformacji wywołanych daną eksploatacją (tu 5 miesięcy) na przypowierzchniowe warstwy górotworu, a tym samym ustalić początek i koniec tego okresu.

LITERATURA

1. Goszcz A., Kotyrba A., Zakolski R.: Zmiany oporności elektrycznej górotworu poprzedzające tąpnięcie z mechanizmem poślizgowym w KWK „Porąbka-Klimontów". Mat. Konf. Tąpania 94, Wyd. GIG. Katowice 1994, 203-211.
2. Stopiński W.: Model dylatacyjno-progowy zmian oporności skał nienasyconych. Publ. Inst. Geoph. Pol. Acad. Sc. M-6 (176), 199-232, 1985.
3. Stopiński W., Teisseyre R.: Precursory rock resistivity variations related to mining tremors. Acta Geoph. Pol. 30, 4, 293-320, 1982.
4. Zakolski R.: Wpływ ciśnienia na opór elektryczny skał. Biuletyn Informacyjny Geofizyka nr 1, Wyd. Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych, Warszawa 1979.
5. Marcak H., Zuberek W.M.: Geofizyka górnicza. Śląskie Wydawnictwo Górnicze. Katowice 1994.
6. Czypionka S., Goszcz A., Lisiecki B.: Wyznaczanie obszarów oddziaływania krawędzi eksploatacji zatrzymanej w pokładach w oparciu o badania geofizyczne. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie nr 2, 1979.
7. Goszcz A., Ćwięk B., Dworak J.: Kontrola procesu formowania pierwszego pełnego zawału metodą geoelektryczną. Zesz. Nauk. Pol. Śl., Górnictwo z. 104, Gliwice 1980.
8. Marcak H., Tomecka-Suchoń S.: Model przewodnictwa elektrycznego próbek skalnych poddanych naprężeniom trójosiowym. Publ. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sc. M - 15 (235), 286-300, 1990.
9. Marcak H., Tomecka-Suchoń S.: Assesment of rock fracturing degree by means of electrical resistivity measurements. Proc. of III-rd Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society, Arhus, Denmark 1997.
10. Gustkiewicz J.: Synoptic view of mechanical behaviour of rocks under triaxial comperssion. Rock at Great Depth. Maury & Fourmaintraux (eds). Balkema, Rotterdam 1989.
11. Gustkiewicz J.: Compressibility of rocks with a special consideration given to pore pressure. Poromechanics. Thimus at al. (eds). Balkema, Rotterdam 1998.
12. Gustkiewicz J.: poradnik Geofizyka Górniczego. Tom 1. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Kraków 1994.
13. Stopiński W., Ponomariew A., Łoś W.: Wykorzystanie zmian oporności elektrycznej ośrodka w badaniach laboratoryjnych. Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., M-10 (213), 1988.

14. Kwaśniewski M.A., Mogi K.: Faulting of a foliated rock in general triaxial field of compressive stresses. Tectonophysics of Mining Areas. Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach nr 1602. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 1996.
15. Nizicki R.: Opis geologiczny profilu. Praca niepublikowana, 2001.
16. Kaczor D.: Obserwacje zmian zachodzących w górotworze podczas jego deformacji za pomocą metod elektrooporowych. Materiały sympozjum Warsztaty 2002 z cyklu "Zagrożenia naturalne w Górnictwie".Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2002.

Praca powstała w ramach grantu KBN nr 5 T12A 002 22.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Zych

Abstract

As a general works dealing with the process of rocks deformation try to explain changes of values of given physical quantities though the tensions descending from the exploitation. Many of the works handle with the solving of the mining problems concerned with discovering of underground voids and tectonics dislocations which appeared, or these that exist, around the excavation and on the surface of earth. Relatively there are not so many articles on the estimation of rock mass behavior in the zone between long wall mining and surface of the rock during the exploration. On this account the researches of this area were undertaken using the resistivity method. Because in the course of long wall exploration the subsurface layers suffer from deformation. Such deformations bring about changes in physical features of the layers. It was estimated that temporal measurements of layers resistivity by sounding method let describe the subsurface layers rock mass. On this purpose the measurements were carried out on the "Katowice-Kleofas" Mine territory of Górnośląskie Zagłębie Węglowe. The researches were carried out the area situated above the explorated coal bed during two years time. In every measurement point azimuthally spread of measurements layout was used. Such a usage of layouts helped to observe changes of electrical features of rock layers in relation to the active exploitation front and anisotropy of rock layers resistivity.