



Remigiusz MYDLIKOWSKI*, Krzysztof MANIAK**, Stanisław WÓJTOWICZ***

Metoda pomiaru promieniowania EM do oceny rozwoju procesu niszczenia w górotworze

Streszczenie: W kopalniach podziemnych w wyniku wykonywania różnego rodzaju wyrobisk, na osuwiskach ziemi podczas ich aktywnych ruchów a także w czasie trzęsień ziemi dochodzi do zmian pierwotnego pola naprężenia i deformacji górotworu. Górotwór lub materiał skalny poddawany różnego rodzaju obciążeniom ulega deformacji trwałej i jest źródłem różnego rodzaju fal sejsmicznych, emisji sejsmoakustycznej (SA) i elektromagnetycznej (EM). W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych emisji elektromagnetycznej w czasie jednoosiowego ściskania próbek skalnych. Uzyskane wyniki pomiarów emisji EM oraz emisji SA wskazują na ich silny związek ze stopniem obciążenia badanej próbki skalnej. W analizie otrzymanych wyników stwierdzono, że emisja EM dokładniej odzwierciedla stan naprężenia i deformacji w próbce w porównaniu do emisji SA. Można wnioskować, iż opracowanie systemu obserwacyjnego opartego o pomiar emisji EM może być przydatny w wyrobiskach górniczych do oceny zagrożeń związanych z obciążaniem skał. System taki powinien pracować bezinwazyjnie oraz charakteryzować się niskim kosztem i nieskomplikowaną obsługą. Budowa takiego systemu może wspomagać stosowane powszechnie systemy geofizyczne w kopalniach.

Słowa kluczowe: emisja elektromagnetyczna, górotwór, proces niszczenia, działalność górnicza

EM emission measurement method for estimation of the destruction process development in the rock mass

Abstract: In underground mines, as a result of various excavations, landslides during their active movements and during earthquakes change the original tension and deformation of the rock. The rock or rock material subjected to various types of stresses is subject to permanent deformation and is a source of various types of seismic emissions, including seismoacoustic (SA) and electromagnetic (EM).

The paper presents the results of laboratory tests of electromagnetic emission during the uniaxial load of rock samples. Obtained results of EM emission measurements and SA emission indicate their strong relation to the

* Dr inż., Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki; e-mail: remigiusz.mydlkowski@pwr.edu.pl

** Dr inż., Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy we Wrocławiu.

*** Mgr inż., Schneider Electric Energy Poland – REFA Świebodzice.

degree of load of the test rock sample. In the analysis of the results obtained, it was found that the EM emission more accurately reflects the state of stress and deformation in the sample compared to the SA emission. It can be concluded that the development of an EM emission monitoring system can be useful in mining excavations to assess the risks associated with rock loading. Such a system should work non-invasively and be characterized by low cost and uncomplicated service.

The construction of such a system can support the commonly used geophysical systems in mines.

Keywords: electromagnetic emission, rock mass, destruction process, mining

Wprowadzenie

W kopalniach podziemnych dochodzi do zmian pierwotnego pola naprężenia w wyniku wykonania różnego rodzaju wyrobisk oraz prowadzonej eksploatacji (Pilecki 1999; Dubiński i in. 2002). Górotwór lub materiał skalny poddawany różnorodnym obciążeniom ulega deformacji trwałej i jest źródłem różnego rodzaju fal sejsmicznych (Marcak i Zuberek 1994; Czarny i in. 2016), emisji sejsmoakustycznej (SA) (Głowacka i Pilecki 1991; Pilecki 1992) i elektromagnetycznej (EM) (Frid i Vozoff 2005). Należy podkreślić, że emisja EM towarzyszy również różnego rodzaju ruchom masowym, w tym osuwiskowym (Maniak 2015).

Emitowany sygnał EM silnie zależy od wielkości zmian deformacyjno-naprężeniowych w górotworze. Sygnał ten posiada częstotliwości od kilkuset Hz do kilku kHz (Bahat i in. 2005). Emisja tego sygnału o charakterze tłumionych oscylacji związana jest ściśle z takimi zjawiskami jak:

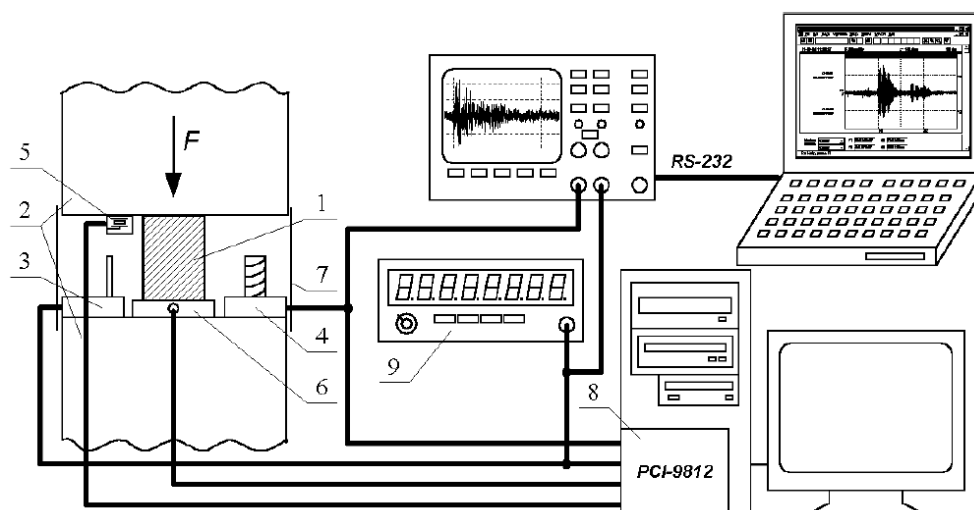
- efekt piezoelektryczny, tj. powstawanie ładunków elektrycznych pod wpływem deformacji ściskanego kryształu,
- proces tworzenia się mikropęknięć o długości od pojedynczych milimetrów do dziesiętnych, a nawet setnych części milimetra w strukturze skały,
- turbulentny przepływ cieczy przez ośrodek porowaty.

W materiale skalnym poddawanych obciążeniom pojawiają się nadmierne naprężenia oraz deformacje trwałe, które zależą od wielu czynników (Gustkiewicz i Skudrzyk 1985; Gustkiewicz 1994). W ujęciu mikroskopowym, w wyniku wzrostu naprężenia i deformacji skały, wytwarzane są wolne elektrony, które wytwarzają potencjały napięciowe. Każdą skałę o strukturze porowatej i nasyconej medium złożowym lub zawierającą minerały ilaste można rozpatrywać jako ośrodek półprzewodnikowy. W ośrodku takim wytworzone elektrony przemieszczają się z obszarów, w których naprężenia i deformacje są większe do obszarów, gdzie są mniejsze, co stanowi przepływ prądu związany z emisją pola magnetycznego. Z tych względów do oceny emitowanej fali EM dokonuje się pomiaru jej składowej elektrycznej oraz magnetycznej (Wang i in. 2011; Hu i in. 2014; Yavorovich i in. 2016; Greiling i Obermeyer 2010).

Badania emisji elektromagnetycznej skał, prowadzone są przez wiele ośrodków naukowych na świecie. Najważniejszymi ośrodkami badawczymi są zespoły kierowane przez Frida w Izraelu (Frid Vozoff 2005), Kurleny w Rosji (Kurlenya i in. 1999), Wang w Chinach (Wang i in. 2011, 2012; Li i in. 2016) oraz Obermeyer w Niemczech (Greiling i Obermeyer 2010). W wyniku prowadzenia badań powstały również prototypy urządzeń pozwalające na wykonywanie pomiarów samoistnego promieniowania elektromagnetycznego skał w istniejących kopalniach, tunelach oraz osuwiskach ziemnych (Wang i in. 2011, 2012; Greiling i Obermeyer 2010).

1. Laboratoryjne pomiary emisji EM skał

Na rysunku 1 przedstawiono prototypowy schemat układu pomiarowego do badania emisji elektromagnetycznej próbek skalnych poddawanych jednoosiowemu obciążeniu. Badana próbka skalna (1) umieszczona jest między zaciskami prasy mechanicznej (2). W niewielkiej odległości od badanej próbki (3–5 cm) umieszczone są czujniki pola elektrycznego (3) oraz magnetycznego (4). Do pomiaru siły działającej na próbkę użyto tensometru (6) przymocowanego bezpośrednio do zacisku prasy hydraulicznej. W odległości 50 mm od próbki umieszczony jest akcelerator (5) mierzący przyspieszenie, które jest proporcjonalne do intensywności emisji sejsmoakustycznej. Poziom emisji EM podczas zwiększania obciążenia badanej próbki skalnej jest dość niski. W celu uniknięcia zakłóceń elektromagnetycznych, generowanych przez energię elektryczną, fale radiowe i niektóre urządzenia elektryczne zastosowano ekran elektromagnetyczny umieszczony wokół badanej próbki (7).



Rys. 1. Schemat pomiarowy do pomiaru emisji EM próbek skalnych poddawanych naprężeniom jednoosiowym.
Opis w tekście

Fig. 1. Scheme of measuring system for investigating EM emission of rocks subjected to uniaxial load.
Description in the text

Zapisy z czterech czujników rejestrowano na komputerze wyposażonym w czterokanałową kartę pomiarową ADLINK 9812 (8). Dodatkowo czujniki pola elektrycznego i magnetycznego podłączono do oscyloskopu cyfrowego, co umożliwia obserwacje przebiegów czasowych pomiarów oraz ich zapis na dodatkowym komputerze.

Zestaw pomiarowy wyposażono dodatkowo w miernik impulsów (9), dla oceny zgodności pomiaru wielkości emisji EM z pomiarem liczby impulsów. Miernik ten dołączono do wyjścia z czujnika pola elektrycznego (3).

Czujniki do pomiaru emisji EM zbudowane są z anten reagujących na określone pole oraz wzmacniacza o tak dobranej wartości transmitancji i jej zależności od częstotliwości, aby pomiędzy odpowiednim polem a napięciem wyjściowym czujnika była zapewniona liniowa zależność w przedziale częstotliwości od 100 Hz do 100 kHz. Wzmocnienie każdego z czujników jest regulowane, co pozwala na dobór odpowiedniej wartości w zależności od spodziewanej wielkości emisji (Pralat i Wójtowicz 2004).

Pomiary prowadzono przy liniowo rosnącej sile nacisku na badaną próbkę, wywołującą zwiększone naprężenie skalne aż do zniszczenia próbki. Pomiarom poddawano próbki węgla kamiennego pochodzące z jednej z kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w kształcie kostki o wymiarze około 35x35x60 mm oraz próbki dolomitu szarego z jednej z kopalń Le-nicko-Głogowskiego Zagłębia Miedziowego w kształcie walca o średnicy 25 mm i 50 mm wysokości.

2. Wyniki pomiarów

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów uzyskane dla próbki węgla kamiennego. Rysunki przedstawiają badane przebiegi w zawężonym oknie czasowym tuż przed zniszczeniem i po zniszczeniu próbki skalnej. Zniszczenie próbki węgla następuje przy obciążeniu około 39 kN i w czasie około 47,25 s. Przebieg obciążenia (rys. 2a) charakteryzuje się wolnym spadkiem po zniszczeniu próbki, co wynika z bezwładności użytego tensometru.

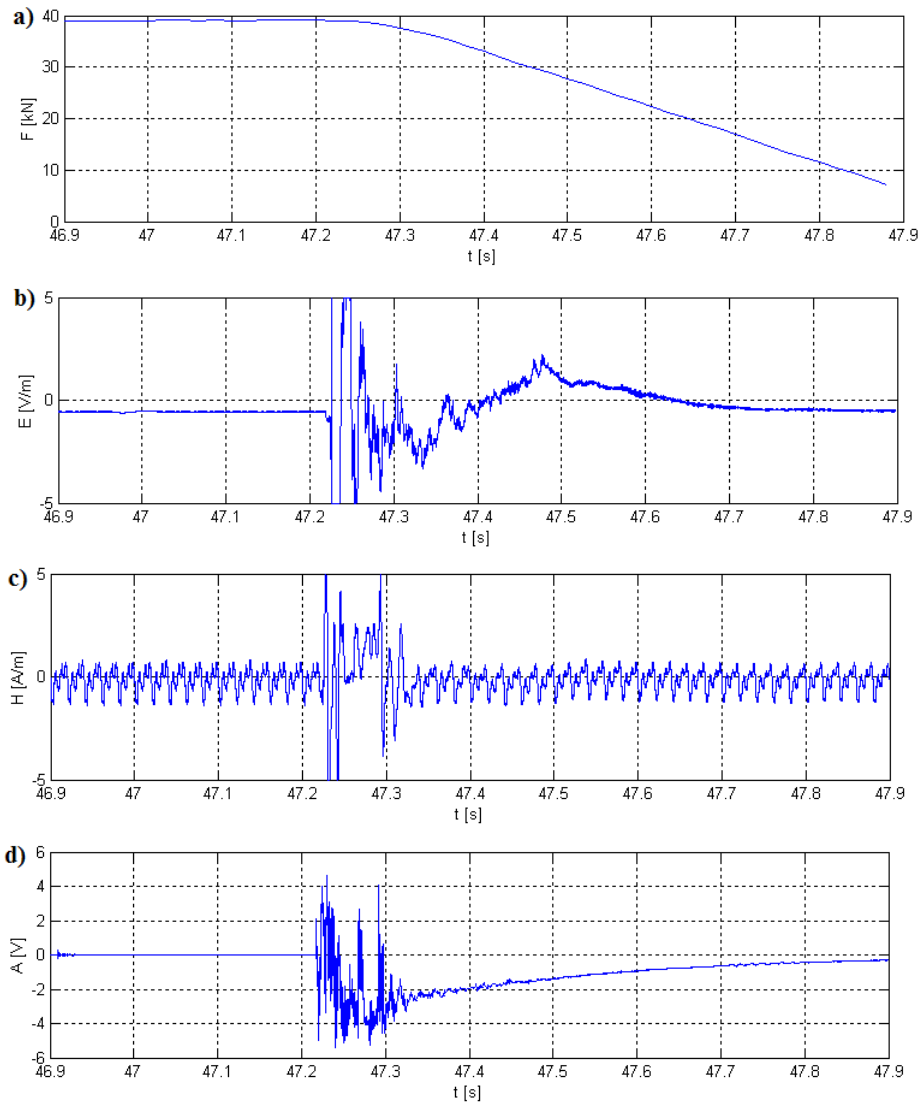
Bezpośrednio przed zniszczeniem próbki węgla oraz w chwili jej zniszczenia zarejestrowano silną emisję EM. Składowa elektryczna, jak i magnetyczna mają charakter impulsowy. Obie składowe fali EM uzyskały znaczne wartości amplitudy osiągając maksymalne zakresy czujników tj. 5V/m i 5A/m. Składowa elektryczna fali EM (rys. 2b) ma znacznie dłuższy czas zaniku niż składowa magnetyczna (rys. 2c). Prawdopodobnie jest to związane z mechanizmem emisji oraz zjawiskami zachodzącymi podczas niszczenia próbki.

Procesowi niszczenia próbki towarzyszy gromadzenie się ładunków elektrycznych i ich przepływ między strefami deformacji w niejednorodnej strukturze skały. Pomiar składowej magnetycznej jest obarczony silnymi zakłóceniami zewnętrznymi, co wskazuje na konieczność rozbudowy tego czujnika o dodatkowe filtry i ekrany sygnałów zewnętrznych. Czas trwania zarejestrowanej emisji sejsmoakustycznej (rys. 2d) jest w przybliżeniu równy czasowi rejestrowanej składowej magnetycznej. Znaczny czas stabilizacji przebiegu tej emisji, po zaniku charakteru impulsowego, związany jest z budową wzmacniacza sygnału dołączonego do akcelerometru.

Z przeprowadzonych pomiarów składowych fali elektromagnetycznej oraz fali sejsmoakustycznej wyraźnie widać, że emisja elektromagnetyczna pojawia się w fazie zniszczenia próbki. Na rysunku 3 pokazano widmo częstotliwościowe składowej elektrycznej. Widmo to zostało przedstawione w przedziale czasowym odpowiadającym zniszczeniu badanej próbki. Wybór składowej elektrycznej wynikał z jej najmniejszego zakłócenia sygnałami zewnętrznymi.

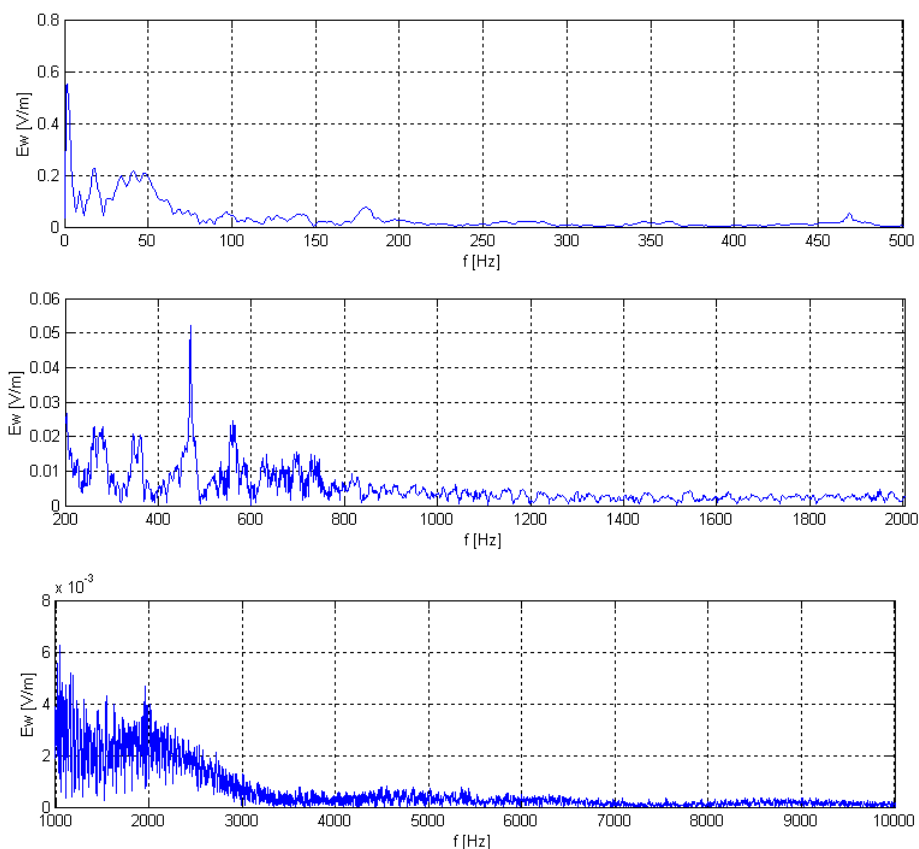
Analizę częstotliwościową przeprowadzono dla trzech zakresów częstotliwości. W zakresie od 0 do 500 Hz widać silny wpływ napięcia zasilającego sieci energetycznej o czę-

stotliwości 50 Hz. Sygnał ten należy uznać za silne zakłócenie zewnętrzne wpływające na wykonywane pomiary. W zakresie częstotliwości od 0,2 do 2 kHz główna energia emitowanego sygnału zawarta jest w przedziale do około 800 Hz. Widoczna jest dominująca częstotliwość emitowanego sygnału przy około 450 Hz. W zakresie częstotliwości od 1 do 10 kHz energia emitowanego sygnału wygasa się i dla częstotliwości sygnałów powyżej 3 kHz wartości amplitud są pomijalnie małe.



Rys. 2. Wyniki pomiarów emisji EM dla próbki węgla kamiennego
a) wykres obciążenia, b) składowa elektryczna fali EM, c) składowa magnetyczna fali EM, d) emisja sejsmoakustyczna

Fig. 2. Measurements of EM emission and AE from coal sample during failure
a) sample loading force, b) electric field, c) magnetic field, d) AE



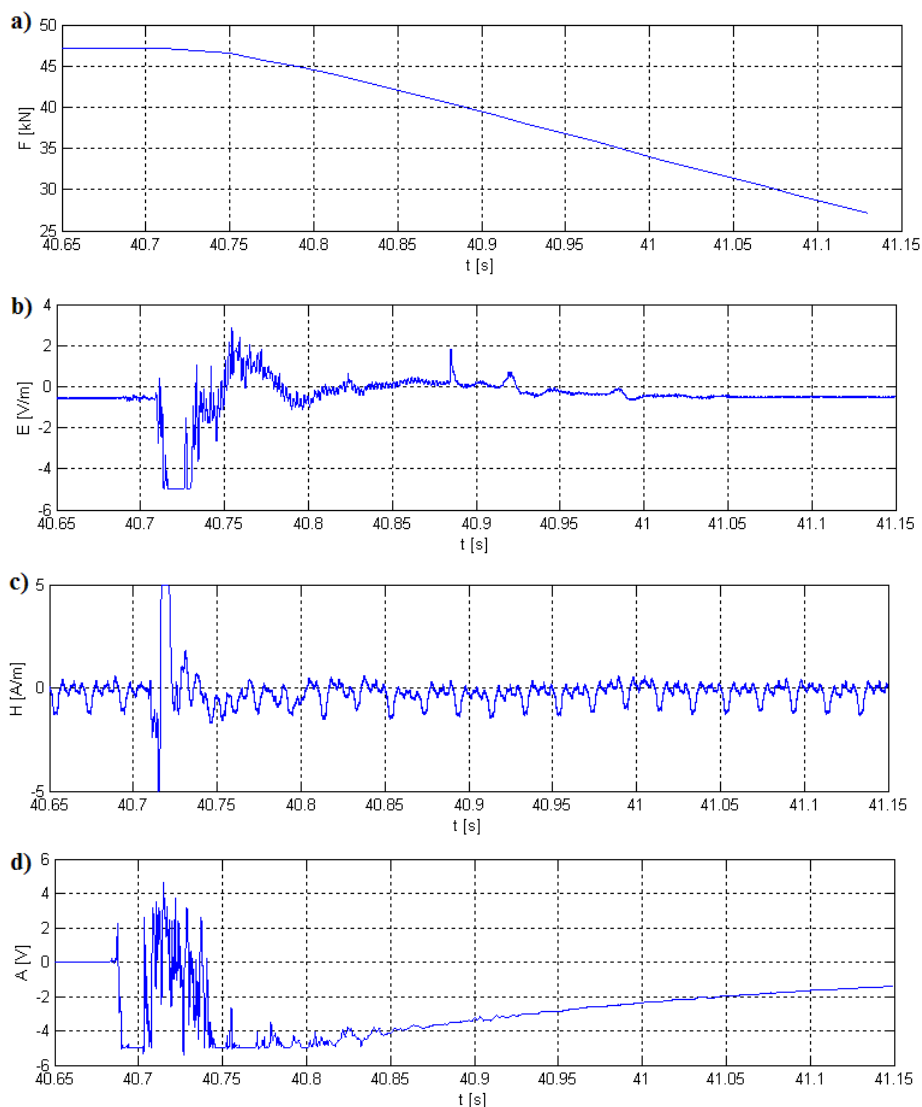
Rys. 3. Widmo częstotliwościowe sygnału składowej elektrycznej fali elektromagnetycznej w różnych przedziałach częstotliwości dla próbki węgla

Fig. 3. Amplitude spectrum for electric component of electromagnetic wave in different frequency ranges for coal sample

Z analizy częstotliwościowej można wnioskować, że emisja EM próbki węgla kamiennego zawiera się w zakresie częstotliwości do około kilku kHz z dominującą częstotliwością 450 Hz.

W przypadku obciążania próbki dolomitu szarego pomiary prowadzono przy liniowo rosnącym obciążeniu (rys. 4) przy wartości około 47 kN i w czasie około 40,7s.

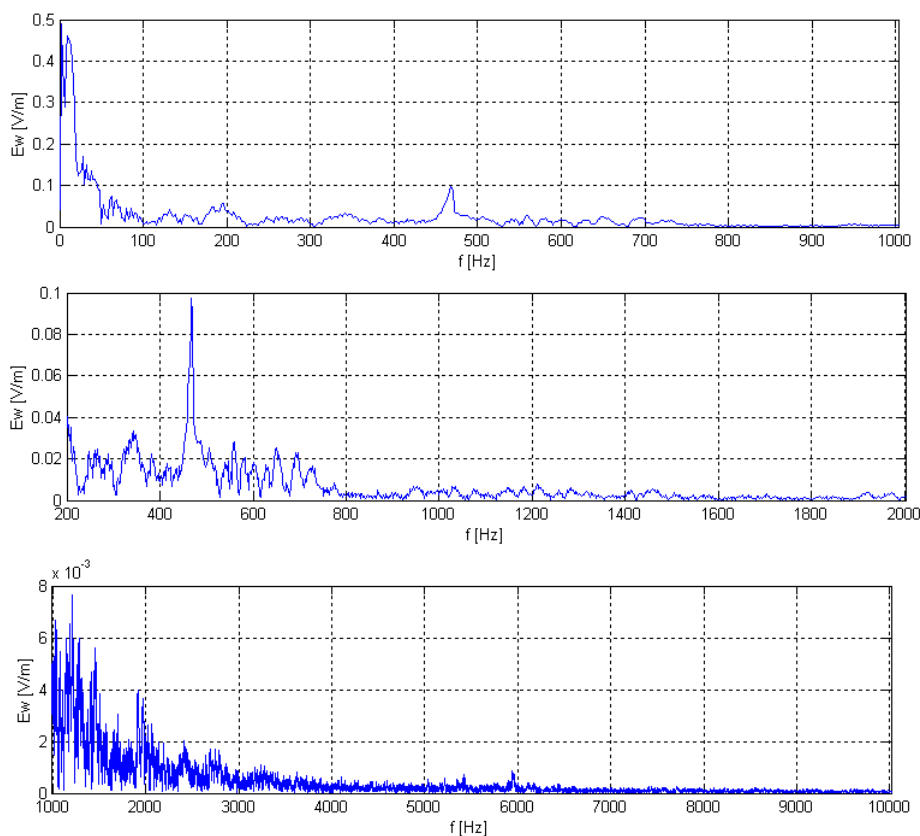
W chwili zniszczenia próbki skalnej zarejestrowano duże amplitudy składowej elektrycznej i magnetycznej fali EM, a także emisji sejsmoakustycznej. Podobnie jak dla próbki węgla, składowa elektryczna fali EM ma najdłuższy przebieg czasowy, z czego można wnioskować, że emisja EM najdokładniej odzwierciedla proces zniszczenia skały. Dla obu badanych próbek widać silną korelację emisji sejsmoakustycznej oraz EM ze wzrostem obciążenia badanej próbki, aż do jej zniszczenia. Przed zniszczeniem badanej próbki zarejestrowano emisję sejsmoakustyczną, a także pojawiła się składowa elektryczna fali EM. Zjawisko to prawdopodobnie związane jest z uwolnieniem wolnych elektronów w pękającej skale i w konsekwencji emisji elektromagnetycznej, jeszcze przed zniszczeniem próbki.



Rys. 4. Wyniki pomiarów emisji EM dla próbki dolomitu szarego: a) wykres obciążenia, b) składowa elektryczna fali EM, c) składowa magnetyczna fali EM, d) emisja sejsmoakustyczna

Fig. 4. Measurements of EM emission and AE from grey dolomite sample during failure: a) sample load, b) electric field, c) magnetic field, d) AE

W próbce dolomitu, podobnie jak dla próbki węgla, składowa elektryczna sygnału EM charakteryzuje się znacznie mniejszymi zakłóceniami zewnętrznymi. Dla tej składowej przeprowadzono analizę widma częstotliwości w chwili zniszczenia próbki. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki tej analizy w trzech zakresach częstotliwości: od 0 do 1 kHz, od 0,2 do 2 kHz i od 1 do 10 kHz. W zakresie do 1 kHz widać silne zakłócenia zewnętrzne związane z częstotliwością sieci energetycznej (50 Hz). W zakresie od 200 Hz do 2 kHz widać



Rys. 5. Widmo częstotliwościowe sygnału składowej elektrycznej fali elektromagnetycznej dla próbki dolomitu szarego

Fig. 5. Amplitude spectrum of electric component for grey dolomite sample

główną energię fali EM w paśmie do 800 Hz z wyraźnie dominującą częstotliwością emitowanego sygnału około 450 Hz. Powyżej 1 kHz energia emitowanego sygnału wygasa się i dla częstotliwości powyżej 3 kHz można uznać, że wartości amplitud są pomijalne.

Obie analizy widma częstotliwościowego przeprowadzone dla próbek węgla kamiennego i dolomitu szarego pokazują, że emitowany sygnał elektromagnetyczny zawiera się w paśmie częstotliwości do kilku kHz. Wyraźnie dominującą częstotliwością obu pomiarów jest częstotliwość 450 Hz.

Podsumowanie

Uzyskane wyniki pomiarów emisji elektromagnetycznej oraz emisji sejsmoakustycznej wskazują na ich silny związek ze stopniem obciążenia badanej próbki skalnej. W analizie otrzymanych wyników stwierdzono, że emisja EM dokładniej odzwierciedla stan naprężenia i deformacji w próbce w porównaniu do emisji sejsmoakustycznej.

Pomiar emisji EM skał może być jednym z elementów systemu monitorującego zachowanie się górotworu wokół wyrobisk górniczych. System taki można wykonać niskim kosztem i charakteryzuje się nieskomplikowaną obsługą.

Pomiary emisji EM mogą być także pomocne przy określaniu skuteczności strzelania odprężającego.

Prezentowana metoda ma charakter rozwojowy i ciągle prowadzone są prace mające na celu udoskonalenie pomiaru i interpretacji uzyskiwanych wyników.

Praca sponsorowana ze zlecenia 0401/0096 Politechniki Wrocławskiej.

Literatura

- Bahat i in. 2005 – Bahat, D., Rabinovitch, A. i Frid, V. 2005. Tensile Fracturing in Rocks. Tectonofractographic and Electromagnetic Radiation Methods. Springer.
- Czarny i in. 2016 – Czarny, R., Marczak, H., Nakata, N., Pilecki, Z. i Isakow, Z. 2016. Monitoring velocity changes caused by underground coal mining using seismic noise. *Pure and Applied Geophysics* Vol. 173, Issue 6, 1907–1916, DOI 10.1007/s00024-015-1234-3.
- Dubiński i in. 2001 – Dubiński, J., Pilecki, Z. i Zuberek, W. eds. 2001. *Badania geofizyczne w kopalniach*. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN.
- Frid, V. i Vozoff, K. 2005. Electromagnetic radiation induced by mining rock failure. *International Journal of Coal Geology* Vol. 64, s. 57.
- Głowacka, E. i Pilecki, Z., 1991: Seismo-acoustic Anomalies and Evaluation of Seismic Hazard at Marcel Coal Mine. *Acta Geophysica* Vol. XXXIX, No. 1, 47–59.
- Greiling, H. i Obermeyer, H. 2010. Natural electromagnetic radiation (EMR) and its application in structural geology and neotectonics. *Journal Geological Society of India* Vol. 75, s. 278–288.
- Gustkiewicz, J. 1994. Elementy wytrzymałości skał. Poradnik geofizyka górniczego. T. 1. *Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej*, s. 91–99.
- Gustkiewicz, J. i Skudrzyk, Z. 1985. Aktywność akustyczna jako wskaźnik kolejnych faz procesu kruchego pęknięcia skał poddanych jednoosiowemu ściskaniu. *Publs. Inst. Geophys.* M-6 (176), s. 149–173.
- Hu i in. 2014 – Hu, S., Wang, E. i Liu, X. 2014. Spatiotemporal multifractal characteristics of electromagnetic radiation in response to deep coal rock bursts. *Natural Hazards and Earth System Sciences* Vol. 14(8), s. 2089.
- Pilecki, Z. 1992. Zastosowanie rejonowej obserwacji sejsmoakustycznej do kontroli stanu zagrożenia tąpnięciami. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* M-16 (245), s. 203–216.
- Pilecki, Z. 1999. Metoda oceny zachowania się masywu skalnego wokół wyrobiska podziemnego. *Studia, Rozprawy, Monografie* 59, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, s. 140.
- Kurlenya i in. 1999 – Kurlenya, M., Vostretsov, A., Kulakov, G. i Yakovitskaya, G. 1999. Estimation of duration of electromagnetic-radiation signals in rock failure. *Journal of Mining Science* Vol. 35(4), s. 387–391.
- Li i in. 2016 – Li, X., Wang, E., Li, Z., Liu, Z., Song, D. i Qiu, L. 2016. Rock Burst Monitoring by Integrated Microseismic and Electromagnetic Radiation Methods. *Rock Mechanics and Rock Engineering* Vol. 49(11), s. 4393–4406.
- Maniak, K. 2015. Measuring Electromagnetic Emissions from Active Landslides. *Journal of Telecommunications and Information Technology* Issue 2, s. 44.
- Prałat, A. i Wójtowicz, S. 2004. Electromagnetic & Acoustic emission from the rock – experimental measurements. *Acta Geodyn. Geomater* Vol. 1, s. 111–119.
- Wang i in. 2011 – Wang, E., He, X., Liu, X. i Li, Z. 2011. A non-contact mine pressure evaluation method by electromagnetic radiation. *Journal of Applied Geophysics* Vol. 75(2), s. 338–344.
- Wang i in. 2012 – Wang, E., He, X., Liu, X. i Xu, W. 2012. Comprehensive monitoring technique based on electromagnetic radiation and its applications to mine pressure. *Safety Science* s. 885–893.
- Yavorovich i in. 2016 – Yavorovich, L., Bepalko, A., Fedotov, P. i Baksht, R. 2016. Electromagnetic radiation generated by acoustic excitation of rock samples. *Acta Geophysica* Vol. 64, No. 5, s. 1446–1461.

