

„Zeszyty Naukowe
Uczelni Jana Wyżykowskiego.
Studia z Nauk Technicznych”
2017 (6), s. 29–49.

FRANCISZEK BALIK
UCZELNIA JANA WYŻYKOWSKIEGO
KRZYSZTOF MANIAK
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY WE WROCŁAWIU
REMIGIUSZ MYDLIKOWSKI
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

Bezkontaktowe metody monitorowania naprężeń skalnych na podstawie pomiarów promieniowania elektromagnetycznego

Streszczenie: W artykule opisano zjawisko samoistnej emisji fali elektromagnetycznej (EM) emitowanej przez materiały skalne poddawane zwiększonym obciążeniom. Zjawisko to powstaje w wyrobiskach kopalnianych, podczas trzęsień ziemi, a także w osuwiskach ziemi podczas ich aktywnych ruchów. Przedstawiono przegląd stosowanych na świecie bezkontaktowych metod badania samoistnej emisji elektromagnetycznej skał. Wykazano, że monitoring samoistnej emisji EM w wyrobiskach górniczych i osuwiskach ziemnych może być pomocny w ocenie zagrożenia związanego ze zniszczeniem skał i powstawaniem tąpnięć lub ruchem osuwiska.

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

Non-contact methods of monitoring the rock tensions based on measuring the electromagnetic radiation

Abstract: The article describes the phenomenon of electromagnetic wave emission (EM) emitted by rock materials subjected to increased loads. This phenomenon arises in mines, during earthquakes and in landslides during their active movements. An overview of the non-contact electromagnetic emission test methods used in the world is presented. It was shown that the monitoring of EM emissions in mining excavations and landslides can be helpful in assessing the risk associated with the destruction of rocks and the emergence of rock bursts or landslide traffic.

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

1. Wprowadzenie

Ingerencja człowieka w podziemną strukturę górotworu w celu prowadzenia gospodarki wydobywczej złóż kopalnych zaburza pierwotną równowagę naprężeń skalnych. W przypadku znacznego obciążania zbocza osuwiska, będącego efektem jego podkopywania lub wpływu czynników atmosferycznych, dochodzi także do zaburzeń naturalnej równowagi. W obu przypadkach ingerencja człowieka powoduje powstawanie nowych naprężeń skalnych prowadzących do deformacji skał, ich zniszczenia i przemieszczenia. Może to powodować różne zjawiska dynamiczne, tak jak gromadzenie się i wybuchy gazu, nagłe zalania wodą, tąpnięcia czy też ruchy osuwiska, czyli nagłe przemieszczanie się warstw ziemi i skalnego podłoża. Jedną z metod monitorowania tych zjawisk oparta jest na pomiarze promieniowania elektromagnetycznego skał poddawanych naprężeniom.

W wielu laboratoriach na świecie prowadzi się badania nad samoistną emisją elektromagnetyczną skał poddawanych naprężeniom mechanicznym [1, 2, 3, 4]. Powstały także urządzenia pozwalające na wykonywanie pomiarów w kopalniach, tunelach lub osuwiskach ziemnych. Stały monitoring promieniowanych sygnałów elektromagnetycznych przez skały poddawane naprężeniom może być wykorzystany do obserwacji i przewidywania dynamicznych ruchów osuwisk ziemnych lub katastrof kopalnianych. Badania nad wykorzystaniem emisji EM do monitorowania stanu naprężeń skał prowadzone są w Rosji (zespół Kurlenya [3]), Izraelu (zespół Frida [1, 2]) oraz Chinach [4–7]. W Chinach stworzono system do monitoringu naprężeń skalnych KBD5 i zastosowano go już w ponad 30 kopalniach.

2. Podstawy teoretyczne i metody badań samoistnej emisji elektromagnetycznej

W wyniku powstających naprężeń w górotworze powodujących jego ściskanie i przemieszczanie następuje samoemisja fali elektromagnetycznej. Emitowany sygnał silnie zależy od naprężeń w górotworze i osiąga częstotliwości od kilkuset Hz do kilku kHz. Emisja tego sygnału o charakterze tłumionych oscylacji związana jest bezpośrednio z następującymi zjawiskami:

- efektem piezoelektrycznym, tj. powstawaniem ładunków elektrycznych pod wpływem deformacji ściskanego kryształu,
- procesem tworzenia się mikropęknięć o długości od pojedynczych milimetrów do dziesiętnych, a nawet setnych części milimetra w strukturze skały,
- turbulentnym przepływem cieczy przez ośrodek porowaty.

Zmienność mikropól i mikroprądów wywołuje powstawanie fal elektromagnetycznych.

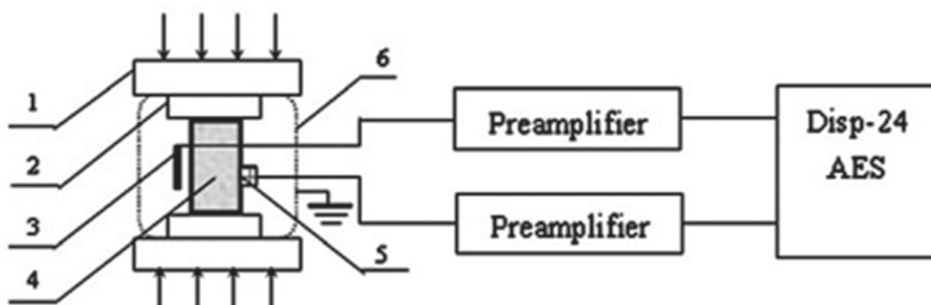
Proces samoistnej emisji fali elektromagnetycznej jest badany i analizowany w wielu laboratoriach naukowych na świecie. W ramach badań przeprowadza się testy mające na celu wyznaczenie widma oraz określenie intensywności emisji EM w zależności od wzrastających naprężeń mechanicznych ściskanych próbek skał. Badaniom laboratoryjnym poddaje się cylindryczne próbki skał uzyskane z wierceń wykonywanych w wyrobiskach górniczych [4, 5, 8].

Schemat typowego układu do wykonywania pomiarów emisji EM przedstawiono na rysunku 2. W układzie takim badana próbka materiału skalnego umieszczana jest między szczękami siłownika hydraulicznego. Zastosowanie siłowników np. typu MTS (rys. 1) pozwala na uzyskiwanie bezpośrednio danych dotyczących siły nacisku na ściskaną próbkę. Pozwala to na automatyczne tworzenie wykresu siły nacisku na próbkę w funkcji czasu. W bliskiej odległości od ściskanej próbki skalnej umieszczane są czujniki do pomiaru samoistnego promieniowania elektromagnetycznego. Używane są wyskokoczułe czujniki do pomiaru pola elektrycznego wywołanego różnicą potencjałów oraz pola magnetycznego związanego z przepływem prądu. Każdy z czujników składa się z anteny reagującej na określone pole oraz wzmacniacza zapewniającego prawidłową pracę układu w szerokim zakresie częstotliwości. Dodatkowo wzmacniacz charakteryzuje się zmiennym wzmocnieniem, tak by zapewnić odpowiednią detekcję sygnału w zależności od poziomu jego emisji.



Rys. 1. MTS elektro-hydrauliczny servo – test systemu

Źródło: oprac. własne.



Rys. 2. System do badania promieniowania elektromagnetycznego próbek skał; 1) siłownik hydrauliczny, 2) podkładki izolacyjne, 3) antena elektromagnetyczna, 4) badana próbka skalna, 5) czujnik akustyczny, 6) ekran elektromagnetyczny

Źródło: oprac. własne na podstawie [4].

Poziom samoistnej emisji EM podczas zwiększającego naprężenia mechanicznego na badaną próbkę skalną jest dość niski. W celu uniknięcia zakłóceń elektromagnetycznych generowanych przez energię elektryczną, fale radiowe i niektóre urządzenia elektryczne stosuje się ekran elektromagnetyczny umieszczony wokół badanej próbki. Ponieważ emisja EM przez poddaną obciążeniu skałę ma charakter impulsowy, układ pomiarowy jest wyposażony także w miernik zliczający liczbę generowanych impulsów. Dodatkowo, by potwierdzić korelację samoemisji EM z emisją akustyczną skał poddawanych naprężeniom, stosowany jest czujnik akustyczny. Sygnały ze wszystkich czujników przekazywane są do karty pomiarowej, gdzie są rejestrowane i dalej poddawane analizie w komputerze podłączonym do systemu pomiarowego (DISP-24 AES).

Laboratoryjne badania niszczące próbki skalne wskazują na jednoznaczność korelację sygnału akustycznego oraz emisji fali elektromagnetycznej ze wzrostem jednoosiowych naprężeń ściskających badane próbki skalne. Wyniki takich badań są podstawą do budowy systemów pomiarowych znajdujących zastosowania w kopalniach lub osuwiskach.

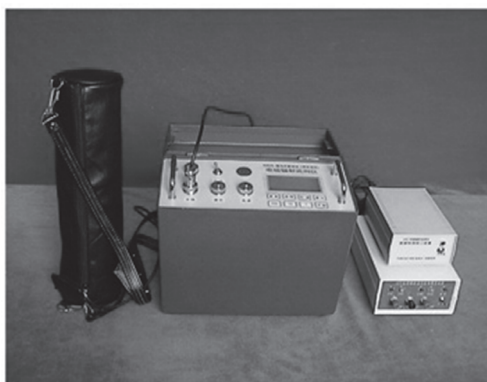
3. Przegląd istniejących systemów pomiarowych emisji EM

W ciągu ostatnich lat powstało kilka urządzeń do pomiaru i analizy emitowanej samoistnie fali EM przez skały poddawane naprężeniom. Urządzenia te znajdują coraz szersze zastosowanie do oceny naprężeń skalnych mogących powodować zagrożenia wyrzutami gazów i skał, tąpnięciami lub ruchami osuwisk ziemnych. W artykule przedstawiono kilka z takich urządzeń produkowanych na świecie oraz podobne urządzenia powstające na Politechnice Wrocławskiej.

3.1. System KBD

Badania nad wykorzystaniem samoistnej emisji EM do monitorowania stanu zagrożenia w wyrobiskach górniczych prowadzone są w kilku ośrodkach w Chinach. Ocenia się,

że wykorzystanie tej metody znalazło najszersze zastosowanie w tym właśnie kraju. Stworzony system do oceny zagrożeń [4–7] oceniany jest wysoko ze względu na bezinwazyjność, nieutrudnianie pracy w kopalni oraz niski koszt aparatury i łatwość jego obsługi. System nazwany KBD5 (KBD7 – nowsza wersja) pokazany na rysunku 3 składa się z szerokopasmowych kierunkowych anten odbiorczych o dużej czułości, monitorujących określony obszar złoża i połączonych z urządzeniem przetwarzającym i przechowującym dane pomiarowe. Główne parametry techniczne urządzenia to: efektywny kierunek monitorowania: 60°; efektywny zakres monitorowania: 7–22 m; szerokość pasma 1–500 kHz; sposób komunikowania się: RS485 lub standardowy sygnał wyjściowy (4–20 mA, 200–1000 Hz).



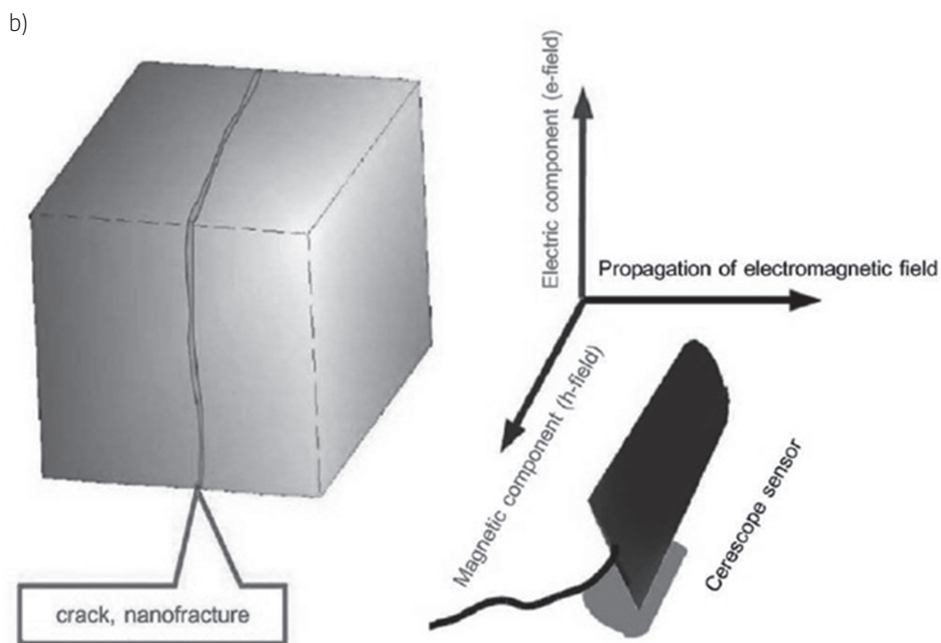
Rys. 3. Przenośny system do pomiaru promieniowania EM: a) KBD5, b) KBD7
Źródło: oprac. własne na podstawie [4, 5].

3.2. Cerescop

Cerescop jest mobilnym urządzeniem umożliwiającym pomiary promieniowania elektromagnetycznego skał poddawanych naprężeniom (rys. 4) [10].

a)





Rys. 4. Urządzenie Cerescop (a) oraz szkic emisji pola EM związanego z powstaniem pęknięcia w skale (b) [10]

Źródło: oprac. własne.

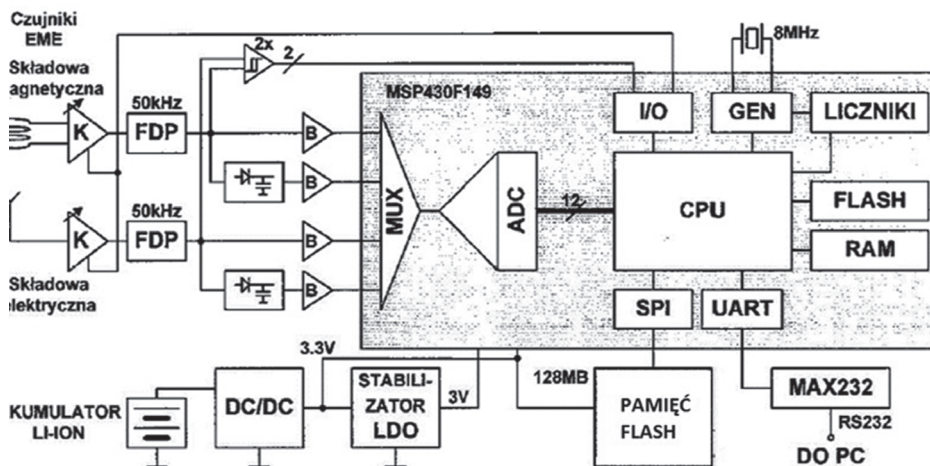
Urządzenie to stosowane jest głównie przez geologów do pomiaru kierunków naturalnej emisji EM w celu uzyskania informacji o naprężeniach skorupy ziemskiej. Wykorzystywane jest również do identyfikacji warunków naprężeń w potencjalnych osuwiskach ziemnych oraz w badaniach określających powstawanie szczelin skalnych wywołanych naprężeniami w tunelach podziemnych.

Najistotniejszym elementem urządzenia jest antena ferrytowa wrażliwa na magnetyczny składnik pola elektromagnetycznego o częstotliwości 12,8 kHz. Cerescop przeznaczony jest do odbioru impulsów EM o częstotliwościach z zakresu od 5 kHz do 50 kHz. Dobór odpowiedniej częstotliwości pracy tego urządzenia pozwala na rejestrację sygnałów z odpowiedniej głębokości skały. Dolny zakres częstotliwości wynoszący 5 kHz pozwala rejestrować sygnały z głębokości kilkudziesięciu metrów, górny – w bliskiej odległości od anteny pomiarowej.

W celu zachowania elastyczności i maksymalnej selektywności, Cerescop uśrednia odbierane impulsy, skutecznie eliminując szumy zakłócające jego pracę. Dodatkowo użytkownik ma możliwość przeprowadzenia analizy częstotliwościowej w celu eliminowania fal zakłócających właściwy pomiar.

3.3. Systemy do pomiaru emisji EM zbudowane na Politechnice Wrocławskiej

3.3.1. System do badania naprężeń w górotworach na podstawie pomiarów emisji EM (system MSP430_PWr)



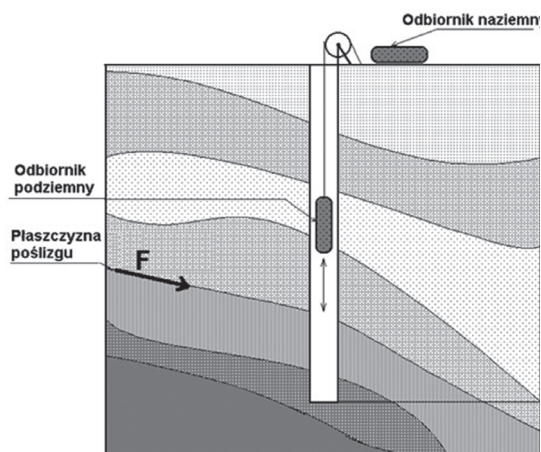
Rys. 5. Miernik natężenia pola EM

Źródło: oprac. własne.

System, którego schemat strukturalny został pokazany na rysunku 5, składa się z anten o wysokiej czułości przeznaczonych do pomiaru składowej magnetycznej i składowej elektrycznej fali EM emitowanej przez badane skały, odpowiednich filtrów dolnoprzepustowych i wzmacniaczy pomiarowych. Sygnały pochodzące z obu torów pomiarowych są poprzez multiplexer podawane na przetwornik analogowo-cyfrowy. Następnie, sygnały cyfrowe podawane są do procesora sygnałowego, gdzie po obróbce statystycznej są przesyłane do pamięci. Wyniki pomiarów mogą być, w dowolnym momencie, skopiowane przez użytkownika systemu.

3.3.2. System do pomiaru emisji EM wywołanej przez osuwiska ziemne

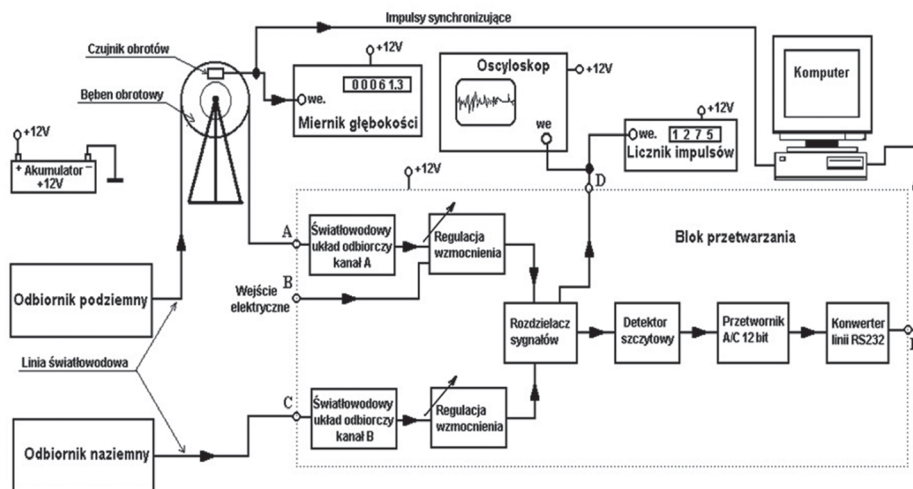
Osuwiska ziemne w stanie aktywnym są źródłem promieniowania elektromagnetycznego [11, 12]. Spowodowane jest to istnieniem znacznych naprężeń mechanicznych w ciele osuwiska powodujących uwolnienie energii m.in. pod postacią promieniowania EM. Emisja pól EM z osuwiska poprzedza (nawet do kilku dni) widoczne ruchy osuwiska. Sprzęt pomiarowy do obserwacji tej emisji najczęściej budowany jest z wykorzystaniem jednej ze składowych pola EM: elektrycznej lub magnetycznej. Ponieważ emisja pola EM ma charakter impulsowy, urządzenia te zliczają impulsy EM w jednostce czasu. Rejestracja emisji EM odbywa się za pomocą sondy prowadzonej w odwiercie pomiarowym o głębokości g (rys. 6). Aby eliminować zakłócenia elektromagnetyczne, urządzenie pomiarowe wyposażane jest w drugi odbiornik umieszczony na powierzchni, bezpośrednio przy odwiercie pomiarowym.



Rys. 6. Sposób pomiaru pola EM emitowanego przez osuwisko ziemne

Źródło: oprac. własne.

Prototyp systemu do badania promieniowania EM osuwiska powstał w laboratorium Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej (rys. 7) [12]. Jako odbiornik składowej magnetycznej zastosowano antenę ferrytową o częstotliwości pracy 14,5 kHz z czułością odbiornika na poziomie 4×10^{-6} A/m. System umożliwia zliczanie mierzonych impulsów magnetycznych pola, a także rejestrację maksymalnej amplitudy badanych sygnałów.

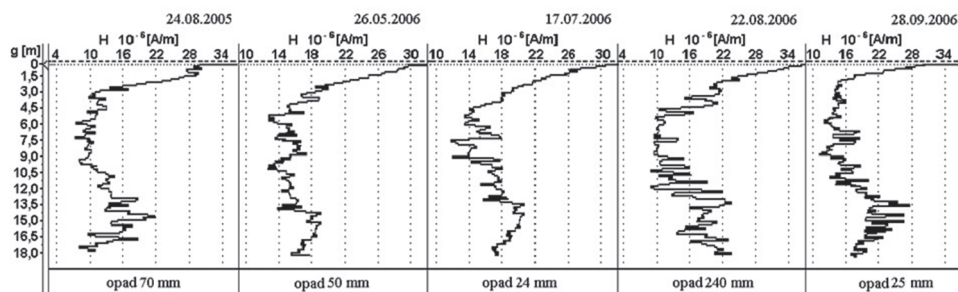


Rys. 7. Schemat blokowy systemu do badania aktywności magnetycznej osuwisk [12]

Źródło: oprac. własne.

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe pomiary emisji składowej magnetycznej pola przeprowadzone w ciągu roku kalendarzowego na osuwisku w Jarosławie. Aktywność tego osuwiska kontrolowana jest przez geologów i potwierdzana pomiarami metodą

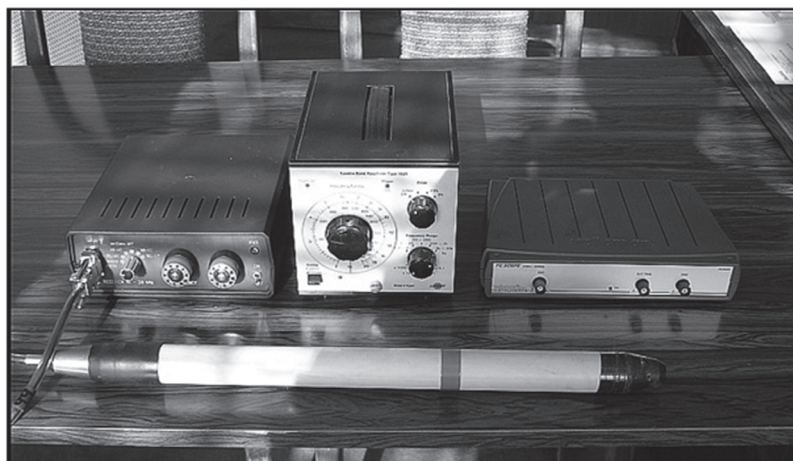
inklinometryczną. Pomiary geologiczne wykazały płaszczyznę poślizgu tego osuwiska pomiędzy 10. a 17. metrem głębokości. Pomiary promieniowania magnetycznego osuwiska, przeprowadzone przez zespół z Politechniki Wrocławskiej, wykazały zwiększoną emisję składowej magnetycznej pola na tych właśnie głębokościach.



Rys. 8. Pomiary natężenia pola magnetycznego w odwiercie na osuwisku w Jarosławie wraz z zarejestrowanymi poziomami opadów atmosferycznych

Źródło: oprac. własne na podstawie [12].

Podobny system do pomiaru emisji pola EM przez osuwisko powstał w Czeskiej Akademii Nauk (rys. 9) [13]. System ten, wyposażony tylko w antenę do pracy na głębokości, rejestruje impulsy składowej magnetycznej pola EM o częstotliwości 14,5 kHz.



Rys. 9. System do pomiaru aktywności osuwisk FJV99

Źródło: oprac. własne na podstawie [13].

4. Wyniki badań laboratoryjnych

Na rysunku 10 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów fal EM, generowanych przez skałę, uzyskane w laboratorium w Chinach (system KBD) [4]. Wyniki dotyczą badań dla próbek węgla kamiennego (próbka nr 1) oraz masy skalnej otaczającej wyrobisko

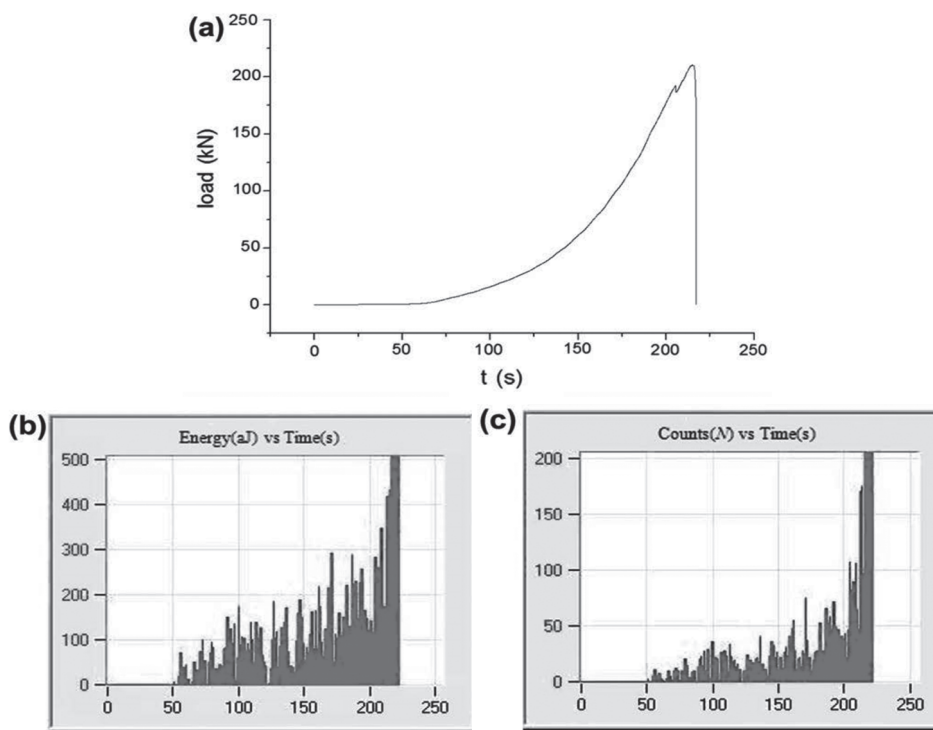
kopalniane (próbka nr 2). Na rysunkach pokazano wykres siły działającej na ściskaną próbkę skalną (rys. 10a), wartość energii promieniowanej fali EM (rys. 10b) oraz liczbę zliczanych impulsów emitowanej fali EM w czasie naprężeń mechanicznych (rys. 10c).

Wyniki jednoznacznie pokazują, że wzrost naprężenia mechanicznego działającego na ściskaną jednoosiowo próbkę powoduje samoistną emisję elektromagnetyczną, charakter zmian jej energii jest podobny do charakteru zmian siły nacisku.

Liczba pojawiających się impulsów elektromagnetycznych oraz ich energia są wprost proporcjonalne do siły, jaka działa na ściskaną próbkę skalną. Można wnioskować, że wzrost liczby impulsów samoistnej fali EM oraz ich energia są bezpośrednio związane z krytyczną wytrzymałością poddawanej ściskaniu próbki skalnej.

W tabeli 1 pokazano opracowane modele matematyczne regresyjne oraz współczynniki korelacji pomiędzy energią sygnału EM a siłą nacisku osiowego, jak również współczynniki korelacji pomiędzy liczbą impulsów a siłą nacisku.

Analizując pokazane wyniki, można stwierdzić, że zachodzi znaczna korelacja pomiędzy siłą nacisku a energią emitowanego sygnału i liczbą generowanych impulsów.



Rys. 10. Wyniki pomiarów emisji EM uzyskane dla próbek węgla nr 1 i nr 2; a) wykres obciążenia, b) zmiany energii promieniowania elektromagnetycznego, oraz c) impulsy promieniowania elektromagnetycznego

Źródło: oprac. własne na podstawie [5].

Tab. 1. Matematyczne modele regresyjne E(P) i N(P), gdzie: P – siła nacisku osiowego w [kN] oraz współczynniki korelacji pomiędzy energią E [dB] sygnału EM a liczbą impulsów N dla wybranych skał

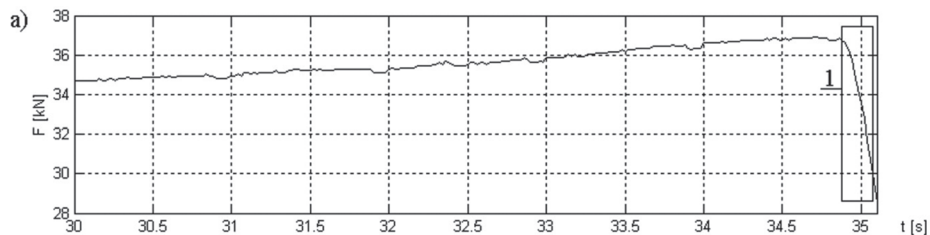
Samples	Expressions	Correlation coefficients R^2
Raw coal	$E = 221.45P + 16216$	0.7999
	$N = 7.1965P^3 - 116.19P^2 + 630.44P + 3173.9$	0.8659
Rock	$E = 0.6901P^3 - 20.059P^2 + 334.29P + 189.38$	0.9872
	$N = -0.0034P^3 + 0.9442P^2 + 3.1492P + 152.7$	0.9403
	$E = 2017.3P - 828.69$	0.9837
Roof-coal-floor	$N = 0.1388P^3 + 17.833P^2 + 122P + 496.92$	0.9882

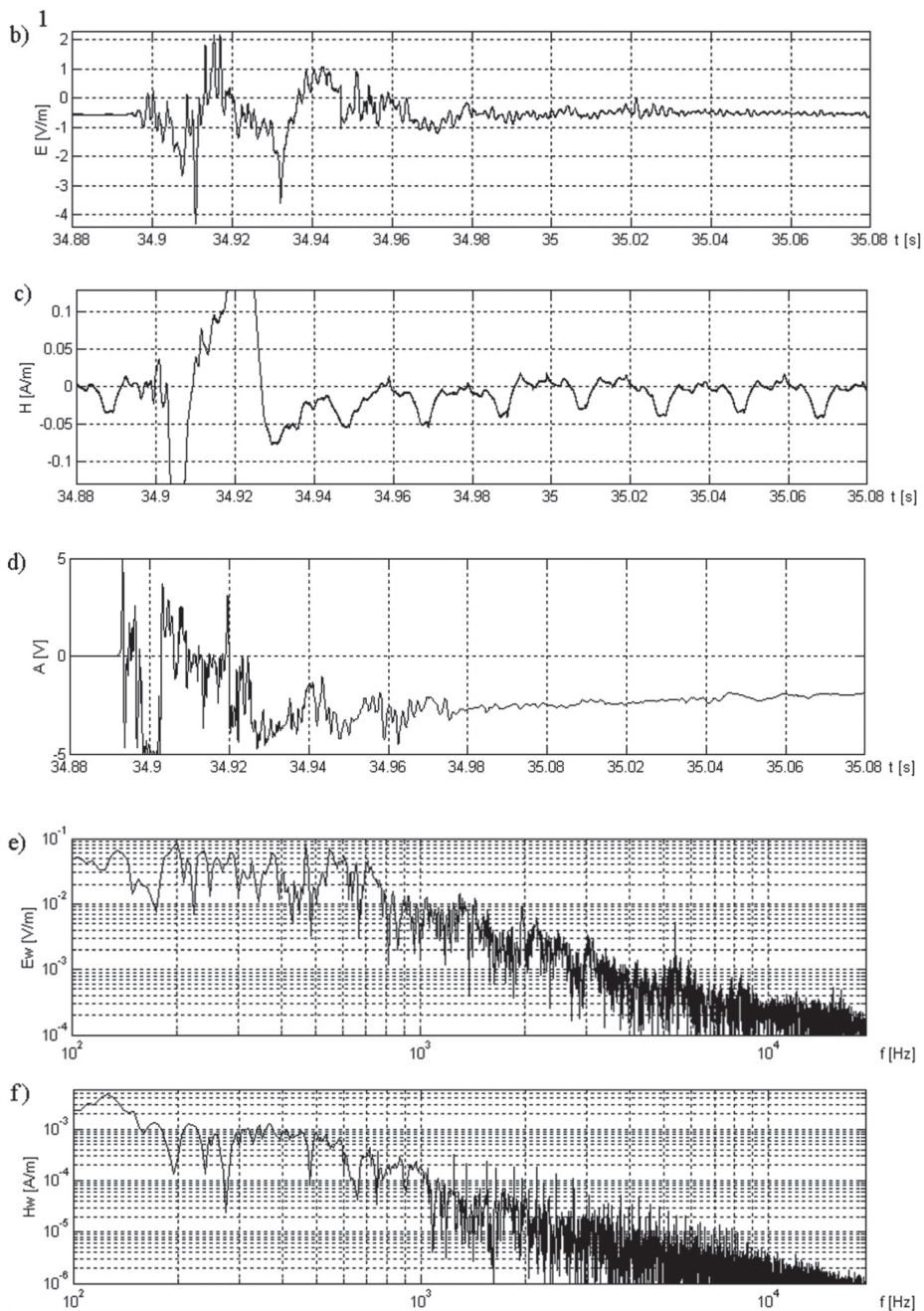
Źródło: oprac. własne.

Na rysunku 11 zaprezentowano wyniki otrzymane ze ściskania próbki dolomitu szarego uzyskanego w laboratorium Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej z wyrobiska kopalni miedzi w Lubinie. Na zbudowanym stanowisku (system MSP430_PWr) dokonywano pomiarów obu składowych fali EM (elektrycznej i magnetycznej) oraz emisji akustycznej rejestrowanej akcelerometrem. Intensywność emisji akustycznej jest proporcjonalna do mierzonego przyspieszenia.

Otrzymane wyniki pokazują relację wzrostu naprężenia badanej próbki z emisją fali elektromagnetycznej, jak i akustycznej. W chwili krytycznego naprężenia powodującego zniszczenie badanej próbki obserwowana jest silna emisja składowej elektrycznej, która emitowana jest przez dłuższy czas, nawet po jej zniszczeniu. Emisja akustyczna natomiast charakteryzuje się silnym wzrostem w chwili zniszczenia i szybkim zanikiem zaraz po nim. Jej czas trwania jest znacznie krótszy niż emisji elektromagnetycznej. Laboratoryjne badania niszczące próbki skalne wskazują na jednoznaczność sygnału akustycznego oraz emisji fali elektromagnetycznej wraz ze wzrostem jednoosiowych naprężeń ściskających badane próbki skalne.

Wyniki takich badań mogą stanowić podstawę do budowy systemów pomiarowych znajdujących zastosowania w badaniach terenowych, np. w kopalniach lub osuwiskach.



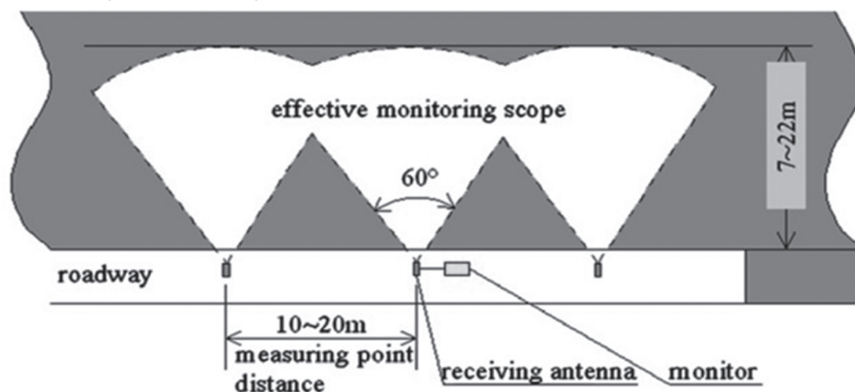


Rys. 11. Wyniki pomiarów emisji EM uzyskanych w PWR dla próbki dolomitu szarego z kopalni w Lubinie; a) wykres obciążenia, b) składowa elektryczna fali EM, c) składowa magnetyczna fali EM, d) emisja akustyczna, e) widmo składowej elektrycznej, f) widmo składowej magnetycznej

Źródło: oprac. własne.

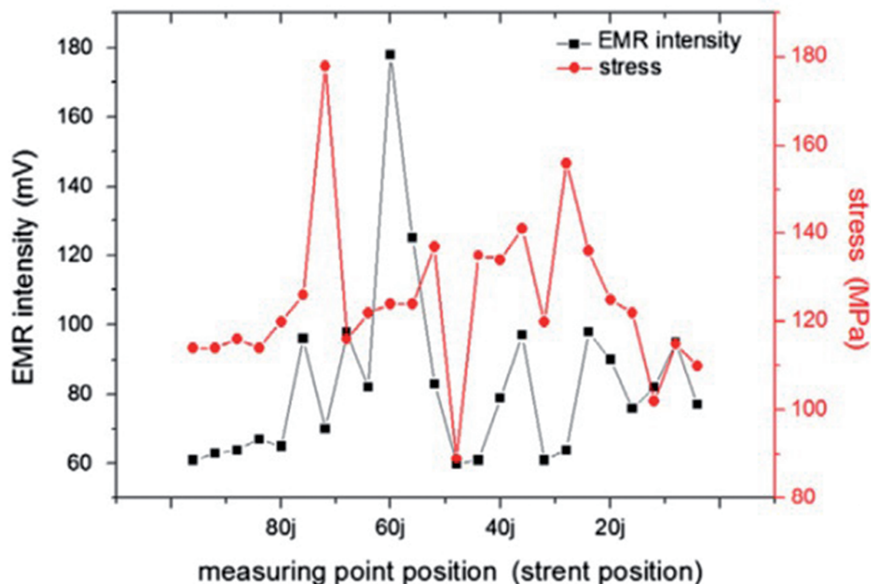
5. Wyniki badań terenowych (w kopalniach)

W kopalniach chińskich testuje się wykorzystanie systemu KBD do stałego monitoringu poziomu promieniowania fali EM. Anteny odbiorcze systemu dokonujące pomiaru promieniowania EM generowanego przez skały rozmieszczone są wzdłuż ściany wyrobiska górniczego rysunku 12. Uzyskane w ten sposób wyniki pomiarowe porównano z wynikami pomiaru siły odczytywanej na stojakach hydraulicznych pracujących na testowanym odcinku wyrobiska.



Rys. 12. Sposoby monitorowania wyrobiska przez przenośny system do pomiaru promieniowania EM – KBD5

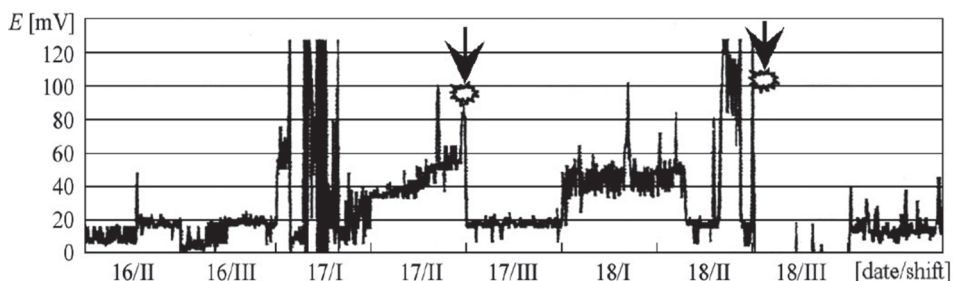
Źródło: oprac. własne na podstawie [5].



Rys. 13. Porównanie emisji EM z ciśnieniem na stojakach hydraulicznych

Źródło: oprac. własne. na podstawie [5].

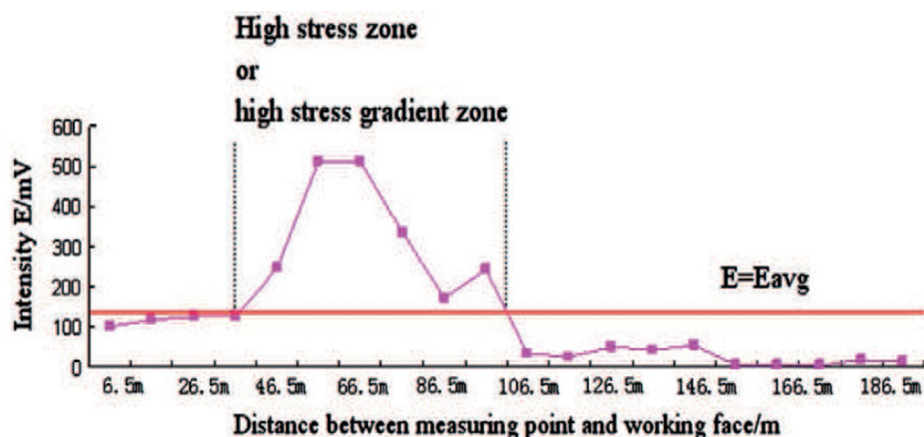
Analizując wykresy pokazane na rysunku 13, należy stwierdzić, że istnieje zależność między intensywnością emisji EM i ciśnieniem górotworu wywieranym na stojaki hydrauliczne. Wyniki uzyskane w kopalni na powierzchni ok. 600 m² rzeczywistego wyrobiska potwierdzają zależność poziomu emisji elektromagnetycznej związanej ze wzrostem naprężenia mechanicznego skał.



Rys. 14. Zmiany amplitudy EMR przed i po zapobiegawczych strzelaniach odpężających [14]

Źródło: oprac. własne na podstawie [14].

Wykorzystując system KBD5 zainstalowany w jednej z kopalń w Chinach, przeprowadzono pomiary amplitudy promieniowania EM przed i po odstrzałach zapobiegawczych dokonywanych na wyrobisku górniczym (rys. 14). Uzyskane wyniki pomiarowe wskazują, że po zapobiegawczych strzelaniach odpężających amplitudy maleją od 80 nawet do 100% poprzedniej wartości [14]. Jak wykazały pomiary EM (rys. 15) [4], w górotworze istnieją strefy zwiększonych naprężeń (powyżej wartości średnich – linia czerwona) i strefy dużych gradientów naprężeń (znaczný spadek). Strefy te stanowią potencjalne obszary tąpnięć lub zawałów warstw skalnych. Przedstawione metody pomiarowe pozwalają określić położenie tych stref.



Rys. 15. Wykres intensywności radiacji EM w zależności od położenia punktów monitorowanych

Źródło: oprac. własne na podstawie [4].

6. Wnioski

Materiał skalny poddany zwiększonemu naprężeniu emituje falę elektromagnetyczną. Emisja ta jest silnie związana ze stopniem obciążenia skały, a natężenie generowanego pola wzrasta wraz z obciążeniem mechanicznym. Właściwości skał potwierdzają badania laboratoryjne.

Obecnie istnieje kilka systemów pozwalających na pomiar promieniowania EM skał w warunkach polowych. Każdy z tych systemów pozwala na bezkontaktowy i bezinwazyjny sposób pomiarów pola EM, nie utrudnia pracy pozostałym służbom nadzorującym pracę obiektu, a także nie wiąże się z dużym kosztem oraz pozwala na łatwą obsługę. Monitoring samoistnej emisji EM w wyrobiskach górniczych i osuwiskach ziemnych może być pomocny w ocenie zagrożenia związanego ze zniszczeniem skał i powstawaniem tąpnięć lub ruchem osuwiska. Wyniki pomiarów EM mogą być także pomocne przy określaniu miejsc dla strzelań odprężających, projektowaniu nowych wyrobisk górniczych oraz wszelkiego typu tuneli.

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

Literatura

- [1] Frid V., Vozoff K., *Electromagnetic radiation induced by mining rock failure*, „International Journal of Coal Geology” 2005, t. 64, s. 57.
- [2] Bahat D., Rabinovitch A., Frid V., *Tensile Fracturing in Rocks. Tectonofractographic and Electromagnetic Radiation Methods*, Springer, 2005.
- [3] Kurlenya M., Vostretsov A., Kulakov G., Yakovitskaya G., *Estimation of duration of electromagnetic-radiation signals in rock failure*, „Journal of Mining Science” 1999, t. 35, nr 4, s. 387–391.
- [4] Wang E., He X., Liu X., Li Z., *A non-contact mine pressure evaluation method by electromagnetic radiation*, „Journal of Applied Geophysics” 2011, t. 75, nr 2, s. 338–344.
- [5] Wang E., He X., Liu X., Xu W., *Comprehensive monitoring technique based on electromagnetic radiation and its applications to mine pressure*, „Safety Science” 2012, s. 885–893.
- [6] Li X., Wang E., Li Z., Liu Z., Song D., Qiu L., *Rock Burst Monitoring by Integrated Microseismic and Electromagnetic Radiation Methods*, „Rock Mechanics and Rock Engineering” 2016, t. 49, nr 11, s. 4393–4406.
- [7] Hu S., Wang E., Liu X., *Spatiotemporal multifractal characteristics of electromagnetic radiation in response to deep coal rock bursts*, „Natural Hazards and Earth System Sciences” 2014, t. 14, nr 8, s. 2089.
- [8] Prałat A., Wójtowicz S., *Electromagnetic & Acoustic emission from the rock – experimental measurements*, „Acta Geodyn.Geomater” 2004, t. 1, s. 111–119.
- [9] Yavorovich L., Bepalko A., Fedotov P., Baksht R., *Electromagnetic radiation generated by acoustic excitation of rock samples*, „Acta Geophysica” 2016, t. 64, nr 5, s. 1446–1461.
- [10] Greiling H., Obermeyer H., *Natural electromagnetic radiation (EMR) and its application in structural geology and neotectonics*, „Journal Geological Society of India” 2010, t. 75, s. 278–288.

- [11] Prałat A., Maniak K., Pompura I., *Electromagnetic phenomena in landslides*, „Acta Geodynamica et Geomaterialia” 2005, t. 2, nr 3, s. 131–138.
- [12] Maniak K., *Measuring Electromagnetic Emissions from Active Landslides*, „Journal of Telecommunications and Information Technology” 2015, t. 2, s. 44.
- [13] Jarosevic, A., Kundracik, *Measurement of the natural high-frequency magnetic field (PEE) in the boreholes using the FJV99 selective picoteslameter*, „EGRSE” 2004, t. 11, nr 1–2, s. 8–12.
- [14] He X., Wang E., Duo L., Nie B., Liu Z., *Electromagnetic radiation monitoring system forecasting coal & gas outburst and its application*, „International Scientific Technical Symposium Rockburst” 2002, s. 423–428.