

Iskrobezpieczne pneumatyczne źródło sejsmiczne do monitorowania i obrazowania górotworu w górnictwie podziemnym

Przemysław Sierodzki, Leszek Remiorz, Mateusz Cwiękała, Krzysztof Krawiec

Streszczenie: Do najbardziej zagrożonych łąpaniami i wyrzutami skał i gazów rejonów kopalń w Polsce należą rejony ścian wydobywczych, w których podejmowane są próby wczesnego wykrywania tych zagrożeń z wykorzystaniem metod aktywnego prześwietlania rejonu ścian wydobywczych. Dotychczas były one realizowane głównie z wykorzystaniem małych ładunków wybuchowych, co nie zawsze jest możliwe ze względu na duże zagrożenie gazowe i obostrzenia z tym związane. Powszechnie jest oczekiwanie na umożliwienie w przyszłości bezpiecznego i tańszego prześwietlania górotworu na bieżąco z wykorzystaniem iskrobezpiecznych lekkich mobilnych pneumatycznych wzbudników podczas wydobywania, w celu wczesnego wykrywania miejsc koncentracji naprężeń charakteryzujących się zmianami prędkości rozchodzenia się wzbudzanych fal sejsmicznych, towarzyszących niebezpiecznym odkształceniom górotworu, które mogą prowadzić do zagrożeń.

Opracowane w Centrum Transferu Technologii EMAG pneumatyczne, iskrobezpieczne źródło sejsmiczne WZB-2 umożliwia generowanie fal sejsmicznych oraz prowadzenie aktywnych badań sejsmicznych w rejonie zagrożenia. W porównaniu do materiałów wybuchowych wzbudnik pneumatyczny jest źródłem bezpiecznym, mobilnym, tańszym w użyciu i może być również używany w trakcie prowadzenia wydobywania. Wyzwalany z powierzchni w krótkich odstępach czasu, przy współpracy z aparaturą sejsmoakustyczną, może pomóc w uzyskaniu wysoko rozdzielczej informacji o zmianie prędkości fal sejsmicznych w górotworze.

W artykule przedstawiono opis rozwiązania oraz charakterystykę techniczną urządzenia. Wykonano pierwsze testy aparatury w warunkach dołowych. Wyniki testów potwierdzają wysoką skuteczność aparatury w prześwietlaniu 200 m ściany pokładu węgla. W rezultacie sumowania rejestracji otrzymanych z 18 uderzeń wzbudnika w ocios uzyskano odpowiedź w przeciwnym chodniku w zakresie do 500 Hz.

Słowa kluczowe: Iskrobezpieczny sterowany wzbudnik drgań, sejsmiczne źródło, monitorowanie górotworu, zagrożenia sejsmiczne w kopalniach, kopalnia węgla, zmiany prędkości fal sejsmicznych

Intrinsically safe pneumatic seismic source for monitoring and imaging of rock mass in underground mining

Abstract: *The regions of mines in Poland most at risk of rock bursts and rock and gas outbursts include longwall areas where attempts are made to detect these threats early using methods of active scanning of the longwall area. So far, they have been carried out mainly with the use of small explosives, which is not always possible due to the high gas hazard and the related restrictions. It is common to expect safe and cheaper scanning of the rock mass in the future with the use of intrinsically safe lightweight mobile pneumatic exciters during mining in order to early detect stress concentration points characterized by changes in the propagation speed of induced seismic waves accompanying dangerous deformations of the rock mass, which may lead to hazards.*

The WZB-2 pneumatic intrinsically safe seismic source developed at the CTT EMAG allows seismic waves to be generated and active seismic surveys to be carried out in the hazard region. Compared to explosives, the pneumatic exciter is a safe, mobile, less expensive source and can also be used during mining operations. Triggered from the surface at short intervals, in cooperation with seismoacoustic apparatus, it can help to obtain high-resolution information about the change in seismic wave velocity in the rock mass.

The paper presents a description of the solution and the technical characteristics of the apparatus. The first tests of the apparatus in underground conditions were carried out. The test results confirm the high effectiveness of the apparatus in screening a 200 m long coal seam. As a result of the summation of the registrations obtained from the 18 strokes of the exciter in the wall face, a response of up to 500 Hz was obtained in the opposite gallery

Keywords: *Intrinsically safe pneumatic source, seismic source, rock mass monitoring, seismic hazard in mines, coal mine, seismic velocity changes*

Wprowadzenie

Jednym z najbardziej powszechnych zagrożeń występujących w kopalniach dołowych w Polsce jest zagrożenie łąpaniami oraz wyrzutami gazów i skał. W celu oceny tego zagrożenia wykonuje się szereg badań i analiz, w tym bardzo często badania metodą aktywnej

tomografii sejsmicznej. Powszechnie stosowane w tej metodzie materiały wybuchowe do generowania fali sejsmicznej pozwalają na zobrazowanie górotworu w dłuższych odstępach czasu, utrudniając śledzenie gwałtownych zmian prędkości fal sejsmicznych w rejonie wydobywania. Dodatkowo użycie

materiałów wybuchowych jest kosztowne i czasochłonne.

Celem pracy było zaprojektowanie, wykonanie, przebadanie w warunkach laboratoryjnych, uzyskanie certyfikatu ATEX oraz przebadanie w warunkach rzeczywistych kopalni iskrobezpiecznego wzbudnika

sejsmicznego, współpracującego z produkowanymi w Centrum Transferu Technologii EMAG CTT EMAG systemami sejsmoakustycznymi i sejsmicznymi, w celu umożliwienia prześwietlenia górotworu falami sejsmicznymi wygenerowanymi wymuszeniem mechanicznym.

W systemach do oceny stanu zagrożenia tąpnięciami obserwuje się dążenie do objęcia kontrolą szczególnie zagrożonych rejonów kopalni, jakimi są rejony ścian wydobywczych.

W projekcie INGENO [1] zaproponowano stosowanie w rejonie ściany wydobywczej różnorodnych tomografii umożliwiających uzyskiwanie uśrednionych wypadkowych tomografii odzwierciedlających względne zmiany prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych w rejonie ściany. Rozpatrywane były tomografia osłabieniowo - tłumieniowa z wykorzystaniem organu urabiającego kombajnu do wzbudzania fali prześwietlającej [2], impulsowa tomografia prędkościowa z wykorzystaniem sterowanych wzbudników mechanicznych do wzbudzania prześwietlającej fali sejsmicznej [1] oraz tomografia pasywna z wykorzystaniem lokalizowanych wstrząsów w obrębie ściany do jej prześwietlenia [3]. Dla zwiększenia wiarygodności oceny zagrożenia zaproponowano uśrednioną charakterystykę tomograficzną [1].

W ramach projektu INGENO zaproponowano konstrukcję mechanicznych wzbudników działających z magazynowaniem energii uderzenia w napiętych przez siłowniki pneumatyczne sprężynach. Konstrukcja mechanicznego iskrobezpiecznego wzbudnika realizowanego w CTT EMAG z trzema



Rys. 2 Obudowy wzbudnika w dwóch wykonaniach WZB 2a i WZB 2b

siłownikami pneumatycznymi uzyskała certyfikat ATEX. Badania wzbudnika w systemie INGENO ujawniły jego wadę związaną z dużą masą (około 50 kg), co utrudniało jego przebudowę. Dokonany dodatkowy świeży przegląd literatury odkrył stosowanie w pracy [4] konstrukcji wzbudnika pozbawionego sprężyn magazynujących energię i związanych z tym siłowników oraz wykorzystywanie w zbiornikach do przechowywania materiałów sypkich w celu ich dokładnego opróżniania (mąka, cement, itp.) pneumatycznych wzbudników firmy Oli [5].

Przystępując do opracowania nowej wersji wzbudnika w CTT EMAG przyjęto następujące założenia techniczne: 1. wykonanie iskrobezpieczne, 2. wykorzystanie wzbudnika firmy Oli i zasilanie pneumatyczne, 3. sterowanie elektryczne (opcja ręczne), 4. energia wymuszenia minimum 100 J, 5. gabaryty i masa umożliwiająca transport jednoosobowy (eliminacja sprężyn i siłowników), 6. realizacja w dwóch wykonaniach z modułem sterującym wewnątrz

obudowy wzbudnika wersja „a” lub na zewnątrz „b”, 7. współpraca z systemami produkowanymi w CCT EMAG sejsmoakustycznym ARES-5/E oraz sejsmicznym ARAMIS M/E.

2. Budowa i działanie wzbudnika

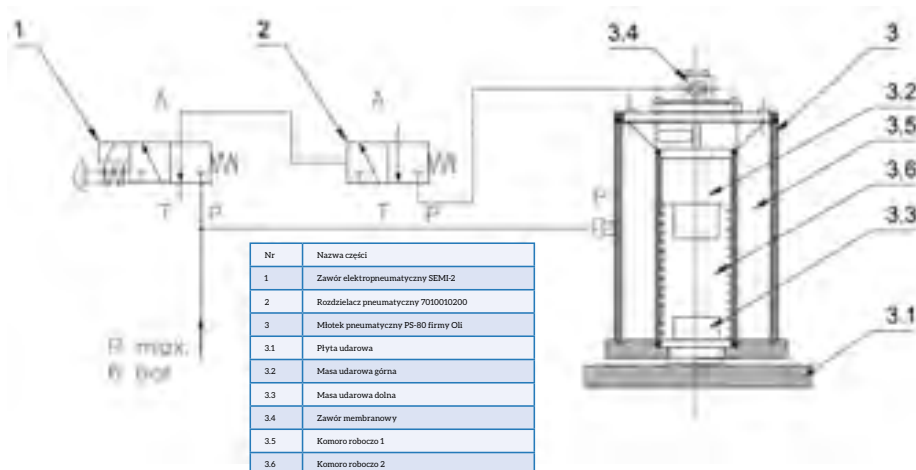
Schemat blokowy nowo opracowanego wzbudnika przedstawiono na rys. 1. Wzbudnik służy do wywołania w podłożu, z którym jest związany, fali sejsmicznej. Efekt ten uzyskiwany jest poprzez uderzenie masy udarowej (3.3) w zamocowaną do podłoża (ociosu) płytę udarową (3.1).

W skład wzbudnika wchodzi: iskrobezpieczny, pneumatyczny zawór SEMI-2 do sterowania wraz z osprzętem pneumatycznym (1), zawór wykonawczy (2), młotek pneumatyczny pojedynczego uderzenia PS-80 (3) wraz z płytą udarową z otworami do zabudowy kotwowej (3.1). Ze względu na części aluminiowe oraz wymagania norm całość zamknięta jest również w pyłoszczelnej obudowie o cechach typu IP54.

W stanie normalnym ciśnienie robocze o maksymalnej dopuszczalnej wartości 6 bar doprowadzone jest do:

- komory roboczej 1 młotka pneumatycznego PS-80 (3.5),
- elektrozaworu SEMI-2/P (1),
- zaworu wykonawczego (2).

Sprężone powietrze wypełniające komorę roboczą 1 (3.5) doprowadzone jest do zaworu membranowego (3.4), będącego integralną częścią młotka PS-80 (3) przez dyszę o małym przepływie. Zamknięty zawór membranowy oddziela komorę roboczą 1 (3.5) oraz komorę roboczą 2 (3.6).



Rys. 1 Schemat pneumatyczny wzbudnika WZB 2.



Rys. 3 Wnętrze wzbudnika WZB 2a i jego obudowa

Parametr	Wartość
Energia uderzenia	~150 J
Zasilanie (powietrze)	3-6 bar
Gabaryty (bez uchwytów)	335x205x280 mm - WZB 2a
	368x205x210 mm - WZB 2b
Waga (bez płyty udarowej)	-25 kg WZB 2a
	-23 kg WZB 2b
Magazyn energii	Powietrze
Konstrukcja kafara	PS-80 (OLI)
Stopień ochrony IP	IP54
Temperatura pracy	+0°C+50°C

Tabela nr.1 Dane techniczne wzbudnika ZB 2 w wersji a i b

Elektrozawór SEMI-2/P (1) otwiera zawór wykonawczy o dużym przepływie (2), który połączony jest z zaworem membranowym (3.4).

Powoduje to natychmiastowe otwarcie zaworu membranowego, połączenie się komór roboczych 1 oraz 2, a co za tym idzie wypchnięcie wewnętrznej masy udarowej górnej (3.2). Masa udarowa górna (3.2) uderza w masę udarową dolną (3.3), która z kolei uderza w płytę udarową (3.1). Powstały impuls udarowy przekazywany jest do podłoża.

Zasada działania obydwóch typów wzbudnika jest identyczna. Zmienia się tylko lokalizacja zaworu SEMI-2/P (1).

- wewnątrz obudowy wzbudnika WZB 2a,
- zewnątrz obudowy wzbudnika WZB 2b.

W związku z powyższym dopuszczalne jest, aby wzbudnik WZB 2a działał również w konfiguracji z zewnętrznym blokiem sterującym.

Na rysunku 2 przedstawiono obudowy wzbudnika WZB 2.

Dane techniczne wzbudnika WZB 2 w wersji a i b przedstawiono w tabeli nr 1.

3. Rezultaty badań certyfikacyjnych wzbudnika WZB 2

Konstruktorem iskrobezpiecznego wzbudnika WZB 2 w obu jego wykonaniach (z elementem magazynującym energię w postaci młotka pneumatycznego pojedynczego uderzenia PS-80 firmy Oli) jest autor korespondencyjny artykułu (Przemysław Sierodzki). Wzbudnik realizowany był w ramach jego doktoratu wdrożeniowego pt. „Wysokorozdzielcze monitorowanie zmian prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych w rejonie frontu eksploataowanej ściany pokładu węgla z wykorzystaniem permanentnego, pneumatycznego źródła sejsmicznego” w ramach Wspólnej Szkoły Doktorskiej Politechniki Śląskiej. Doktorant uruchomił wzbudniki oraz

przeprowadził ich wstępne badania laboratoryjne, po czym nadzorował ustalenie programu badań oraz ich badania atestacyjne w Ośrodku Badań, Atestacji i Certyfikacji OBAC Sp. z o.o. w Gliwicach, w celu uzyskania certyfikatu badania typu UE. W wyniku przeprowadzonych w OBAC badań wzbudnik WZB-2 producenta Centrum Transferu Technologii EMAG Sp. z o.o., które zatrudnia doktoranta uzyskał certyfikat badania typu UE OBAC 22 ATEX 0068X, wydanie 0, który dotyczy konstrukcji, oceny i badań przedmiotowego urządzenia, produktu lub systemu ochronnego zgodnie z Dyrektywą 2014/34/UE.

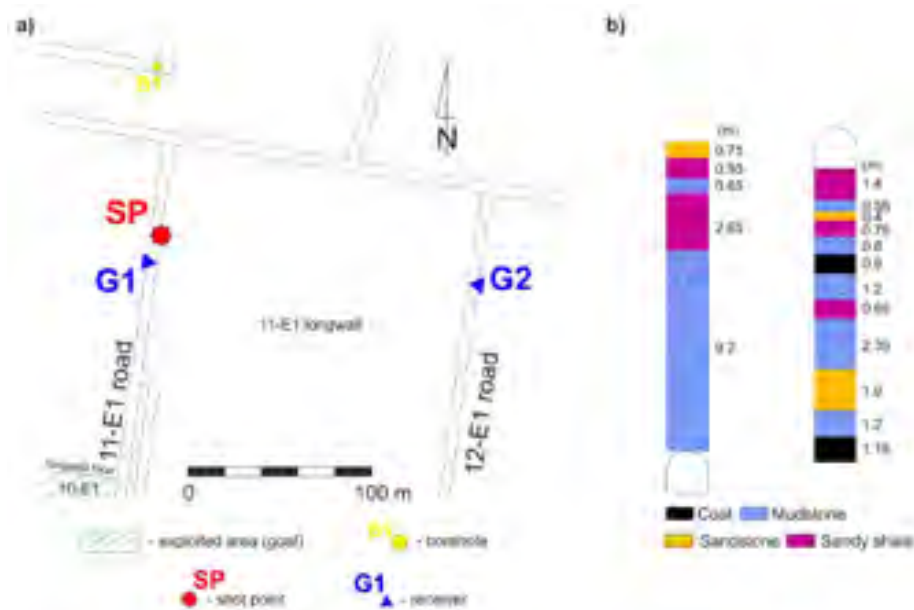
Ośrodek Badań, Atestacji i Certyfikacji OBAC Sp. z o.o. Jednostka Notyfikowana 1461 zgodnie z Artykułem 17i Artykułem 21 Dyrektywy Parlamentu Europejskiego Rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego 2014 r. zaświadcza, że urządzenie, produkt lub system ochronny sprawdzono na zgodność z zasadniczymi wymaganiami w zakresie zdrowia i bezpieczeństwa dotyczącymi projektu, konstrukcji, urządzenia, produktu lub systemu ochronnego przeznaczonego do użytkowania w atmosferach potencjalnie wybuchowych, które podano w załączniku nr II niniejszej dyrektywy. Wyniki oceny i badań oraz wykaz uzgodnionej dokumentacji technicznej podano w poufnym raporcie nr. OBAC /22/ATEX/ 0068.

W celu spełnienia wymagań norm wymienionych w certyfikacie konieczne było zamknięcie aluminiowej konstrukcji młotka PS-80 w stalowej obudowie o stopniu pyłoszczelności co najmniej IP 54. Umożliwia to wyeliminowanie: wnikania materiałów obcych, uderzeń metali lekkich z powierzchniami utlenionymi, uderzeń metali lekkich z powierzchniami twardymi oraz unikanie tarcia pomiędzy materiałami żelaznymi oraz ceramicznymi.

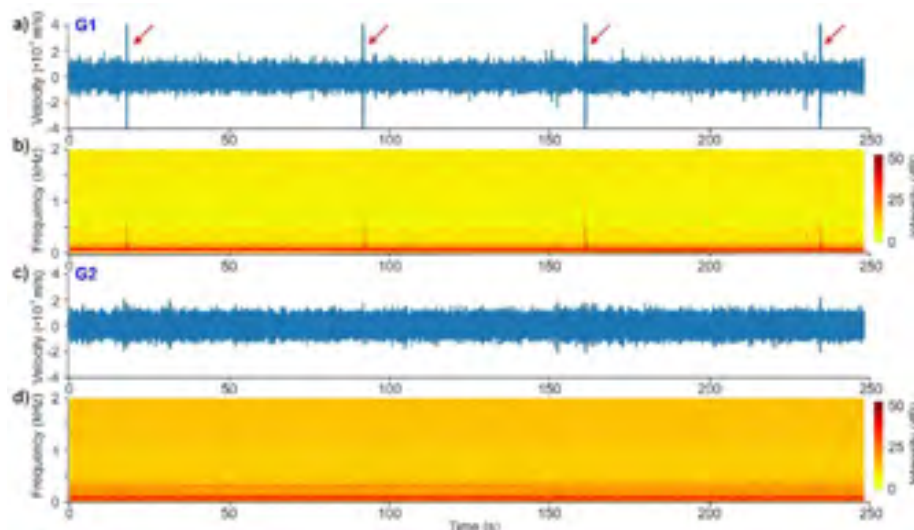
4. Podziemny eksperyment

Testowanie wzbudnika przeprowadzono w KWK ROW Ruch „Rydułtowy” w rejonie ściany 11-E1, w pokładzie 703/1-2 (fig 4.1 a).

Pokład 11-E1 to nowo rozwinięta część pokładu węgla 703/1-2. Ściana 11-E1 jest nowo rozwiniętą częścią pokładu węgla 703/1-2. Głębokość zalegania pokładu



Rys. 4.1 Schemat pomiarowy testu wzbudnika WZB 2



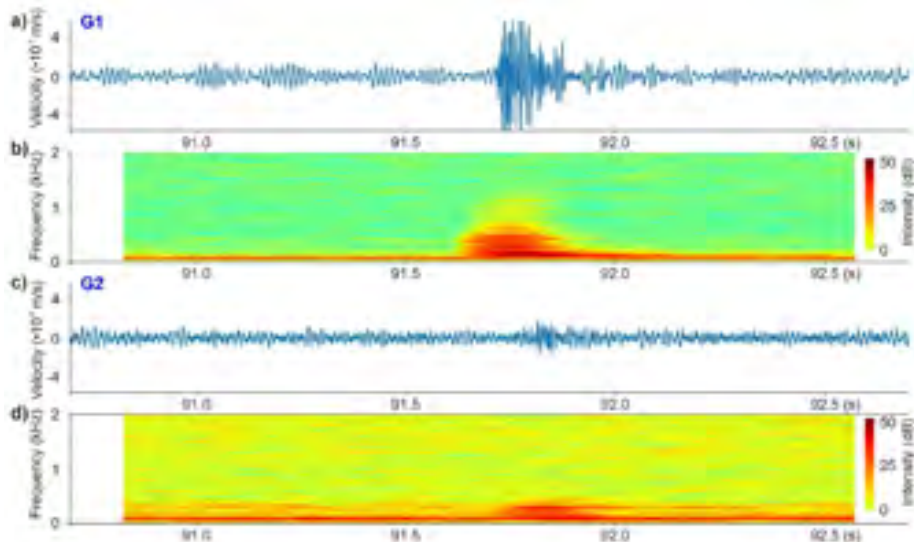
Rys. 5.2 Fragment 250 s ciągłej rejestracji systemem ARES 5/E. Czerwoną strzałką zaznaczono wzbudzenia źródłem WZB 2 zarejestrowane geofonem G1. Zapis sygnału na geofonie G1 (a) w domenie czasu i (b) częstotliwości oraz na geofonie G2 (c) w domenie czasu i (d) częstotliwości

703/1-2 wynosi około 1070 m. Grubość pokładu węgla wynosi 2,05 m. Górnowór stropowy stanowią mułowce i łupki piaszczyste (rys. 4.1 b). W stropie znajduje się kilka cienkich warstw mułowców, łupków piaszczystych i węgla na przemian. Występuje również warstwa piaskowca o grubości 1,9 m. Ogólnie rzecz biorąc, pokład węgla w tym polu jest stabilny bez żadnych zaburzeń tektonicznych.

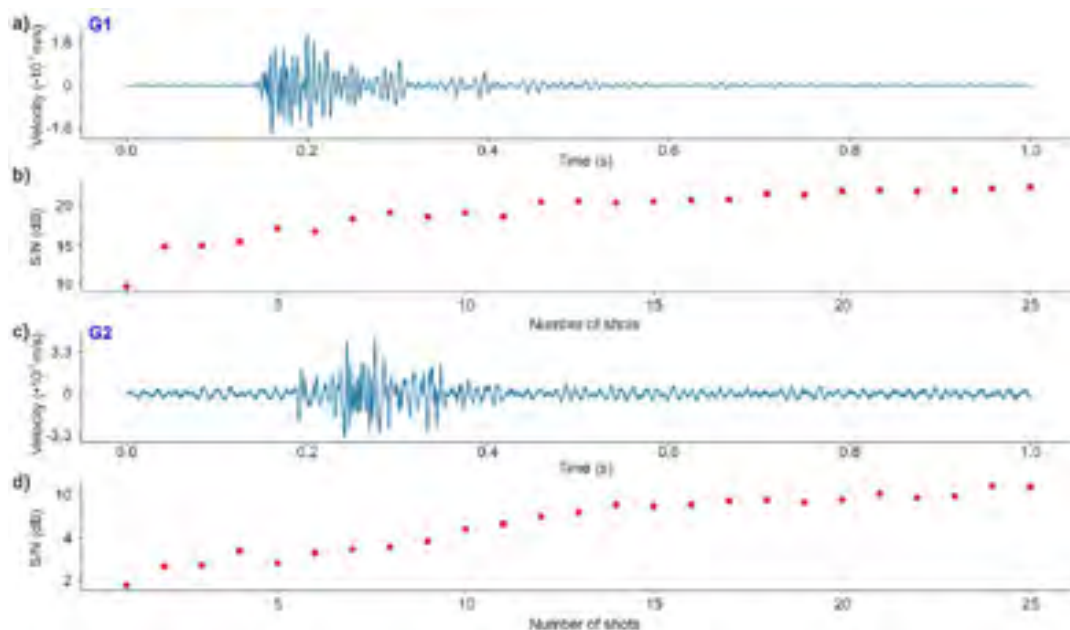
W czasie pomiaru nie prowadzono robót wydobywczych. Wzbudnik został zamontowany we wschodnim ociosie chodnika 11-E1 w połowie miąższości pokładu węgla na 4 kotwach o długości 2,5 m każda. Schemat pomiarowy przedstawiono na rysunku 4.1.

Fale sejsmiczne generowane wzbudnikiem WZB 2 rejestrowano geofonami G1 oraz G2 (Rys. 4.1). Rozmieszczono je odpowiednio 30 m na południe od miejsca zamocowania wzbudnika we wschodnim ociosie chodnika 11-E1 (G1) oraz w zachodnim ociosie chodnika 12-E1 około 200 m od punktu wzbudzenia fali po przeciwległej stronie ściany (G2). Geofony o częstotliwości rezonansowej 28 Hz podłączono do iskrobezpiecznego systemu sejsmoakustycznego ARES-5/E, który pracował w trybie ciągłej rejestracji z próbkowaniem 4 kHz. Podczas testu zarejestrowano impulsy wywołane uderzeniami wzbudnika na obydwu geofonach. Na rysunku 5.2 przedstawiono fragment zapisu w dziedzinie czasu i częstotliwości uzyskanego przy pomocy geofonów G1 oraz G2.

Rysunek 5.3 przedstawia zapis drgań ośrodka skalnego dla pojedynczego uderzenia prototypu wzbudnika w dziedzinie czasu i częstotliwości. W trakcie pomiarów nie prowadzono eksploatacji ani innych robót górniczych w rejonie badań. Można zaobserwować, że sygnał zarejestrowany 30 m od źródła sejsmicznego (geofon G1) charakteryzuje się częstotliwościami do około 1000 Hz. Zakres częstotliwości sygnału rejestrowanego po drugiej stronie ściany rozciąga się do ok. 500 Hz. Amplituda zapisu pojedynczego uderzenia rejestrowanego za pomocą geofonu G2 jest niewiele większa od amplitudy tła sejsmicznego. Dla polepszenia stosunku sygnału użytecznego do szumu wykonano



Rys. 5.3 Pojedyncze uderzenie wzbudnika WZB 2 zarejestrowane przez geofony G1 oraz G2 odpowiednio w dziedzinie czasu (a), (b) i częstotliwości (b), (c).



Rys 5.4 Wynik sumowania 25 zapisów uderzeń prototypu wzbudnika WZB 2 dla geofonów G1 (a) oraz G2 (c). Stosunek sygnału użytecznego do szumu (S/N) w zależności od ilości uderzeń dla geofonów G1 (b) oraz G2 (d).

sumowanie 25 uderzeń wzbudnikiem WZB2. W tym celu wycięto fragmenty ciągłego zapisu zarejestrowanego na geofonach G1 i G2, a następnie otrzymane szeregi czasowe skorelowano ze sobą względem pierwszego wstąpienia wygenerowanej fali. Po zsumowaniu otrzymano zapis przedstawiony na rysunku 5.4. Po zsumowaniu około 25 uderzeń uzyskano znaczący wzrost S/N rzędu 20 dB. Otrzymana paczka fal sejsmicznych zaznacza się wyraźnie już od około 0,1 s do 0,5 s, sugerując obecność zarówno fal objętościowych, jak i fal dyspersyjnych oraz przypuszczalnie fal wielokrotnie rozproszonych.

5. Podsumowanie rezultatów.

Przeprowadzone testy prototypu zoptimalizowanego wzbudnika pneumatycznego WZB 2 wykazały możliwość jego zastosowania do skutecznego wzbudzenia fali sejsmicznej w warunkach podziemnej eksploracji węgla. Głównym celem konstrukcji tego urządzenia jest umożliwienie łatwego i prawie ciągłego monitorowania prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych i pośrednio oceny występowania miejsc groźnych koncentracji naprężeń. Wykonane badania dowiodły, że system seismoakustyczny ARES-5/E z analogową transmisją sygnałów był w stanie zarejestrować fale sejsmiczne różnego typu po przeciwległej stronie ściany. W docelowym rozwiązaniu systemu wiele elementów

wymaga udoskonalenia. Konieczna jest rejestracja zapisu bezpośrednio przy wzbudniku do wykorzystania jej jako znacznik czasowy sumowania, jak również oszacowania energii uderzenia czy poprawy rozdzielczości sumowanych sejsmogramów. Wzbudnik w wersji komercyjnej będzie również umożliwiał zdalne wyzwalania z powierzchni, co pozwoli na pomiar podczas produkcji. Cyfrowa transmisja danych oraz nadajniki z przetwornikami A/D montowane przy geofonach zwiększą dynamikę rejestracji. Z kolei uproszczona konstrukcja wzbudnika i zmniejszona jego masa około 25 kg uczyni go bardziej przyjaznym w stosowaniu i przyczyni się do szerszego wdrażania najbardziej skutecznych aktywnych metod oceny zagrożenia tąpnięciami w górnictwie.

Literatura

[1] Isakow Z. 2016: kierownik projektu i współredaktor wydania. Współautorzy rozdziałów: Augustyniak A., Cianciara A., Cianciara B., Isakow Z., Juzwa J., Kuciara I., Makola R., Piwowarski W., Pysik A., Siciński K., Sierodzki P., Słoka Z., Innowacyjne metody i system do oceny zagrożenia tąpnięciami na podstawie probabilistycznej analizy procesu pęknięcia i geotomografii online, Monografia - wynik realizacji projektu INGENO, Instytut Technik Innowacyjnych ITI EMAG, ISBN 978-83-63674-27-4, str. 1-156.

- [2] Isakow Z. 2009: Geotomography with the help of a cutter-loader working organ as a source of imaging waves, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Elsevier, 46/7, pp. 1235-1242.
- [3] Dębski W. 2010: Seismic Tomography by Monte Carlo Sampling, Pure. Appl. Geophys. vol.167, pp. 131-152.
- [4] Salmon Brian P., Goldswain G., Lynch Richard A., Rebuli Daryl, Olivier Jan C., and Kleynhans Waldo. 2019: Estimating changes in seismic wave velocity from a pneumatic source in an operational mine, Geophysics, ISSN 0016-8033.
- [5] Instrukcja obsługi „Młot pneumatyczny typu PS-80” firmy OLI.

CTT EMAG

mgr inż. Przemysław Sierodzki - Centrum Transferu Technologii EMAG Katowice, Polska

prof. dr hab. inż. Leszek Remiorz
- Politechnika Śląska, Polska

dr inż. Mateusz Cwiękała - KWK ROW Ruch
Rydułtowy, Polska

dr inż. Krzysztof Krawiec - Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią IGSMiE PAN, Kraków, Polska

*Korespondencyjny autor:
Przemysław Sierodzki
E-mail: P.Sierodzki@cttemag.pl