



Pneumatyczne źródło sejsmiczne do monitorowania prędkości fal sejsmicznych w warunkach podziemnej eksploatacji węgla

Przemysław SIERODZKI¹⁾, Leszek REMIORZ²⁾, Zbigniew ISAKOW³⁾,
Rafał CZARNY⁴⁾, Mateusz ĆWIEKAŁA⁵⁾

¹⁾ mgr inż.; CTTEMAG Sp. z o.o. w Katowicach, Politechnika Śląska w Gliwicach

²⁾ dr hab. inż. prof. w PolSI; Politechnika Śląska w Gliwicach

³⁾ dr hab. inż.; CTTEMAG Sp. z o.o. w Katowicach

⁴⁾ dr inż.; Uniwersytet Stanowy Pensylwanii, State College

⁵⁾ mgr inż.; PGG S.A. Oddział KWK ROW Ruch Rydułtowy

<http://doi.org/10.29227/IM-2024-01-106>

Submission date: 17-05-2024 | Review date: 20-06-2024

Abstrakt

W artykule przedstawiono koncepcję pneumatycznego wzbudnika fal sejsmicznych oraz pierwsze rezultaty testu prototypu. W założeniach, konstrukcja źródła ma być dostosowana do warunków podziemnej eksploatacji węgla tj. z zachowaniem wymogów iskrobezpieczeństwa. Wzbudzanie ma odbywać się w krótkich odstępach czasu, rzędu kilku minut, co umożliwi wysokorozdzielcze w czasie monitorowanie prędkości różnych typów fal sejsmicznych. Quasi ciągły pomiar pozwoli na dokładniejsze śledzenie zmian pola naprężeń w rejonie wydobywania zmniejszając tym samym ryzyko wystąpienia tąpnięcia. Projektowane źródło będzie współpracowało z systemem sejsmoakustycznym ARES-5/E.

Słowa kluczowe: źródło sejsmiczne, wzbudnik sejsmiczny, hazard sejsmiczny w kopalni, tąpnięcie górotworu, wstrząsy górnicze, system sejsmiczny

1. Wprowadzenie

Dla bezpieczeństwa pracy w górnictwie kluczowym zadaniem jest utrzymanie stabilności wyrobisk. Proces wydobywania zaburza równowagę górotworu i powoduje występowanie niebezpiecznych koncentracji naprężeń mogących wywoływać tragiczne w skutkach tąpnięcia [1].

Bezpośredni, punktowy pomiar składowych naprężeń, jakkolwiek możliwy przy użyciu różnych czujników, to ze względu na trudny dostęp, objętość i zmienność kontrolowanego obszaru w otoczeniu ściany wydobywczej oraz koszty z tym związane nie jest stosowany praktycznie.

Zdecydowanie lepszym i tańszym sposobem do rozpoznania górotworu i oceny zmienności naprężeń jest wykorzystanie prędkości rozchodzących się w nim fal sejsmicznych wzbudzanych naturalnymi wstrząsami, które zazwyczaj występują w pobliżu miejsc koncentracji naprężeń lub odpalonymi ładunkami wybuchowymi.

W celu uniezależnienia rozpoznania pola naprężeń w górotworze od wstrząsów, ich rozkładu i ewentualnych błędów lokalizacji autorzy zaproponowali, skonstruowali oraz wstępnie przebadali quasi ciągły, impulsowy, tani i łatwy w użyciu wzbudnik fali sejsmicznej WZB Typ 2. Iskrobezpieczny, pneumatycznie sterowany wzbudnik WZB Typ 2 wykorzystywany będzie do wyznaczania prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej od miejsca jej wywołania do miejsca rejestracji przez czujniki geofonowe rozmieszczone w obrębie ściany wydobywczej. Pozwoli to uniknąć stosowania procedur związanych z użyciem małych ładunków wybuchowych w kopalniach metanowych.

2. Stan aktualny rozwoju systemów sejsmicznych do oceny zagrożenia tąpnięciami z wykorzystaniem metod aktywnych stosowanych na bieżąco

W ostatnich latach w rozwoju systemów sejsmicznych do oceny zagrożenia tąpnięciami w podziemnych zakładach górniczych obserwuje się dążenie do wdrażania aktywnych metod sejsmicznych szczególnie w rejonach ścian wydobywczych, gdzie to zagrożonych jest znaczące. Prace w tym kierunku zainicjowane zostały skonstruowaniem, wdrożeniem i przebadaniem w latach 2000–2003 w KWK Bielszowice w ramach projektu PCZ–003–20 realizowanego w Rudzkiej Spółce Węglowej wspólnie z Centrum EMAG, Centrum Mechanizacji i Automatyzacji Górnictwa KOMAG i Głównym Instytutem Górnictwa GIG systemu pt. „System monitorowania i wizualizacji oraz sterowania procesem pracy kompleksu ścianowego w restrukturyzowanych kopalniach węgla kamiennego”. Opracowano wówczas pierwszy w Polsce system do kontroli i klasteryzacji zjawisk dynamicznych w stropie [2] i system GEOTOMO do określania względnych zmian naprężeń przed frontem ściany wydobywczej z wykorzystaniem organu urabiającego kombajnu [3]. Nowe możliwości funkcjonalne tych systemów umożliwiły dokonywanie na bieżąco oceny zagrożenia tąpnięciami. Kolejnym krokiem rozwoju było opracowanie, w latach 2014–2016 systemu pt. „Innowacyjne metody i system do oceny zagrożenia tąpnięciami na podstawie probabilistycznej analizy procesu pęknięcia i geotomografii online” o akronimie INGEO [4]. Prototyp niekomercyjny systemu INGEO, przeznaczony był do oceny zagrożenia tąpnięciami w kopalni, w szczególności w rejonie ściany wydobywczej. System stanowił kontynuację rozwoju znanych i stosowanych w górnictwie systemów: sejsmicznego ARAMIS M/E i sejsmoakustycznego ARES-5/E. Cechowały go nowe, innowacyjne technologie (cyfrowa transmisja sejsmoakustyczna, światłowodowy dołowy koncentrator pomiarowy). Systemy wyposażone były również w narzędzia do sejsmicznej tomografii pasywnej [5]. Uzyskana nowa jakość



Rys. 1. Zdjęcia prototypu niekomercyjnego wzbudnika WZB Typ 1 w systemie INGEO
 Fig. 1. Photos of non-commercial seismic source prototype WZB Type 1 as a part of INGEO system



Rys. 2. Zdjęcia prototypu zoptymalizowanego wzbudnika WZB Typ 2 z płytą uderową i obudową
 Fig. 2. Photos of the optimized seismic source prototype WZB Type 2 with an baseplate and steel case

Tab. 1. Porównanie parametrów wzbudnika WZB Typ 1 oraz WZB Typ 2
 Tab. 1. Comparison of parameters of WZB Type 1 and WZB Type 2 inductor

Parametry	WZB Typ 1 (INGEO)	WZB Typ 2 (prototyp)
Energia uderzenia	~300 J	~150 J
Zasilanie (powietrze)	8-10 bar	3-6 bar
Gabaryty (bez uchwytów)	Ø 430 x 340 mm	350x200x280 mm
Waga (bez płyty uderowej)	~50 kg	~25 kg
Magazyn energii	Sprężyny	Powietrze
Konstrukcja kafara	CTT EMAG	PS-80 (OLI)

rejestrowanych danych stanowiła odpowiedź na rozwijające się trendy na świecie w wykorzystaniu systemów sejsmoakustycznych (mikrosejsmicznych) do monitorowania rejonu wyrzutów gazów [6] oraz przebiegu hydroszczelinowania. W projekcie INGEO podjęto również próbę rozszerzenia funkcjonalności systemu pomiarowego o nowe rodzaje czujników (deformacji, naprężeń, położenia kombajnu) oraz aktywnego wzbudnika sejsmicznego WZB Typ 1. Zasadniczą niedogodnością zaprojektowanego wzbudnika były waga oraz duże rozmiary, co zniechęcało potencjalnych użytkowników od jego stosowania i wdrożeń.

Dla utrzymania koncepcji systemu i dalszego doskonalenia podjęto zasadnicze działania upraszczając jego konstrukcję i zmniejszając jego rozmiar i wagę, kierując się doświadczeniami opisanymi w pracy [7]. Dążono również do zminimalizowania liczby stosowanych wzbudników w systemie i zmniejszenia liczby koniecznych przebudów.

3. Pneumatyczny wzbudnik fali sejsmicznej WZB Typ 2

Na rysunku 1 przedstawiono wzbudnik WZB Typ 1 zaprojektowany podczas realizacji projektu INGEO. Zasilaniem urządzenia jest sprężone powietrze kontrolowane przez iskrobezpieczny elektrozawór SEMI-2/P. Energia magazynowana jest w trzech sprężynach napinanych przez pneumatyczne siłowniki.

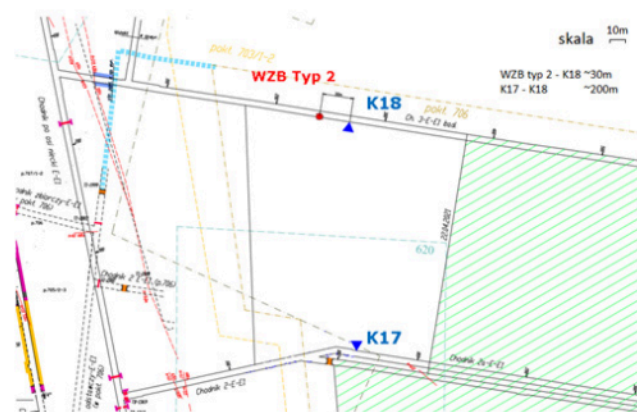
W celu zoptymalizowania konstrukcji wzbudnika zmieniono zasadniczo jego zasadę działania. Wylimitowano sprę-

żyny gromadzące energię potencjalną i napinające je siłowniki pneumatyczne, zastępując je masą i układem pneumatycznym pełniącym rolę sprężyny pneumatycznej nadającej masie uderowej wzbudnika w krótkim czasie dużą energię kinetyczną. Pozwoliło to zredukować wagę urządzenia ułatwiając jego stosowanie. Dużą zaletą jest również zastosowanie gotowego komponentu o sprawdzonej konstrukcji produkowanego seryjnie przez firmę OLI młota pneumatycznego typu PS-80 [8]. Korpus wzbudnika wykonano z odlewu aluminiowego, jednak ze względu na konieczność zapewnienia iskrobezpieczeństwa urządzenia dodano stalową osłonę. Na rysunku 3.2 przedstawiono zdjęcia konstrukcji prototypu wzbudnika WZB Typ 2. Konstrukcja składa się z młota pneumatycznego, iskrobezpiecznego sterowania oraz obudowy.

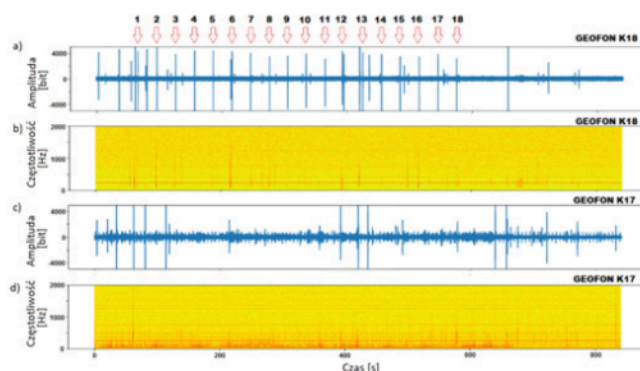
W tabeli 1 przedstawiono porównanie parametrów wzbudnika WZB Typ 1 z projektu INGEO, oraz nowego prototypu WZB Typ 2.

4. Karta pomiarowa REX_LAN Systemu ARES-5/E

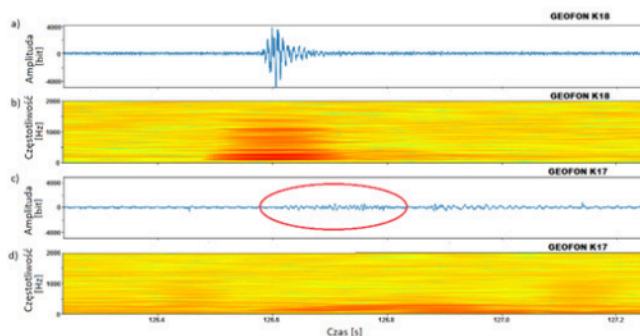
Rejestrowanie i gromadzenie danych podczas pomiaru wzbudnikiem WZB Typ 2 umożliwia zmodyfikowana wersja popularnego systemu sejsmoakustycznego ARES-5/E. Modyfikacja polega na zamontowaniu karty REX_LAN do jednostki rejestrującej systemu ARES-5/E. Zmodyfikowana karta jest w pełni kompatybilna z dotychczas używaną kartą REX. Różnica polega na dodaniu 8 kanałowego przetwornika A/C oraz udostępnieniu wysokorozdzielczego cyfrowego



Rys. 3. Schemat pomiarowy testu wzbudnika WZB Typ 2 (czerwona kropka). K18 i K17 (niebieskie trójkąty) – czujniki geofonowe
 Fig. 3. Underground settings of seismic source WZB Typ 2 (red dot) test. Geophones K18 and K17 are marked by blue triangles



Rys. 4. Ponad 800 s ciągłej rejestracji systemem ARES 5/E wraz z nową kartą REX_LAN. Czerwoną strzałką zaznaczono 18 wzbudzeń źródłem WZB Typ 2 odebranych geofonami K18 i K17. (a) rejestracja K18 w domenie czasu, (b) rejestracja K18 w domenie częstotliwości, (c) rejestracja K17 w domenie czasu, (d) rejestracja K17 w domenie częstotliwości
 Fig. 4. Over 800 s continuous recording of the ARES 5/E with REX_LAN card. The red arrows the seismic source events are marked. (a) K18 in time domain, (b) K18 in frequency domain, (c) K17 in time domain, (d) K17 in frequency domain



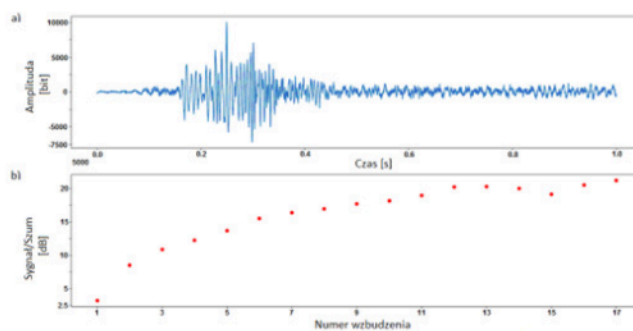
Rys. 5. Pojedyncze uderzenie wzbudnika WZB Typ 2 zarejestrowane przez geofony K17 oraz K18. Rejestracja K18 w domenie czasu (a) i częstotliwości (b), rejestracja K17 w domenie czasu (c) i częstotliwości (d)
 Fig. 5. Single strike of the seismic source WZB Type 2 recorded by geophone K17 and K18. K18 in time domain (a) and frequency domain (b). K17 in time domain (c) and frequency domain (d)

strumienia danych sejsmicznych wysyłanych portem LAN. Rozwiązanie to konsoliduje sposób cyfrowej transmisji danych z systemów ARAMIS M/E, ARES-5/E oraz INGEO. Nowy sposób transmisji dostarcza cyfrowy zapis strumienia danych sejsmicznych oraz zasadniczo upraszcza współpracę systemu ARES z systemem ARAMIS. Modyfikacja umożliwia wykorzystanie programowego detektora impulsów sejsmoakustycznych oraz wykorzystanie rejestrowanych danych systemu do stosowania w nowo opracowanych metodach analiz systemu INGEO.

5. Testowanie prototypu wzbudnika WZB Typ 2

Testowanie wzbudnika przeprowadzono w KWK ROW Ruch „Rydułtowy” w dniu 24 kwietnia 2021 roku, w rejonie ściany III-E-E1, w pokładzie 713/1-2. W czasie pomiaru nie prowadzono robót wydobywczych. Wzbudnik został zamontowany w środku pokładu węgla na 4 kotwach o długości 2,5 m każda. Schemat pomiarowy przedstawiono na rysunku 3.

Fale sejsmiczne generowane wzbudnikiem WZB Typ 2 odbierano geofonami K18 oraz K17 (Rys. 3). Geofony o częstotliwości rezonansowej 28 Hz podłączono do iskrobezpiecz-



Rys. 6. Wynik sumowania 16 uderzeń prototypu wzbudnika WBZ Typ 2 jako sumarycznej rejestracji geofonu K17 (a) . Stosunek sygnału użytecznego do szumu w zależności od ilości uderzeń (b)

Fig. 6. The result of 16 shots stacking on the waveforms recorded at K17 (a) and correspond-ing S/N ratio (b)

nego systemu sejsmoakustycznego ARES-5/E. Rozmieszczono je odpowiednio 30 m od wzbudzenia (geofon K18) oraz około 200 m od wzbudzenia fali po przeciwległej stronie ściany, w chodniku nadścianowym 2-E-E1 (geofon K17). System ARES-5/E pracował w trybie ciągłej rejestracji z nową kartą REX_LAN. Częstotliwość próbkowania wynosiła 4000 Hz. Podczas testu zarejestrowano impulsy wywołwane uderzeniami wzbudnika podczas jego testowania. Na rysunku 4 przedstawiono rejestracje geofonów K18 oraz K17 w dziedzinie czasu i częstotliwości podczas 18 uderzeń wzbudnika dokonywanych w odstępach co 30 sekund. Na rejestracje nakładają się naturalne wstrząsy występujące na ścianie. Rejon badań był obszarem kopalni o dużej aktywności sejsmicznej.

Rysunek 5 przedstawia rejestrację pojedynczego uderzenia w dziedzinie czasu i częstotliwości. Trzeba zaznaczyć, że są to pomiary podczas postoju ściany i tło sejsmiczne jest bardzo niskie. Można zaobserwować, że sygnał odebrany 30 m od źródła sejsmicznego (geofon K18) charakteryzuje się częstotliwościami widma do około 1400 Hz. Ten sam sygnał odebrany po drugiej stronie ściany po przebyciu około 200 m (geofon K17) ma zredukowane widmo do około 500 Hz.

WZB Typ 2 w założeniach ma dostarczać wysokorozdzielczego zapisu sejsmicznego fal propagujących przez całą ścianę (na wzór aktywnej tomografii sejsmicznej) w krótkich odstępach czasu. Pojedyncze wzbudzenie, jak pokazuje rysunek 5c i 5d nie przedstawia wysokiego współczynnika sygnału użytecznego do szumu (S/N). Jednym ze sposobów poprawy S/N jest sumowanie sekwencji uderzeń. Na rysunku 6. przedstawiono wynik sumowania 17 uderzeń. Do sumowania wykorzystano korelację pomiędzy sejsmogramami z geofonu K18 następujących kolejno po sobie wzbudzeń (Rys. 4 czerwone strzałki). Po zsumowaniu około 10 uderzeń uży-

skano 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 przypuszczanie fal wielokrotnie rozproszonych.

5. Wnioski

Przeprowadzone testy prototypu zoptymalizowanego wzbudnika pneumatycznego WZB Typ 2 wykazały możliwość jego zastosowania do skutecznego wzbudzania fali sejsmicznej w warunkach podziemnej eksploatacji 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 sejsmoakustyczny 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 mógł być wyzwalany z powierzchni, co pozwoli na pomiar podczas produkcji. Cyfrowa transmisja danych oraz nadajniki z przetwornikami A/C montowane przy geofonach (system INGEO) zwiększą dynamikę rejestracji. Z kolei uproszczona konstrukcja wzbudnika i zmniejszona jego masa do około 25 kg uczyni go bardziej przyjaznym w stosowaniu i przyczyni się do szerszego wdrażania najbardziej skutecznych aktywnych metod oceny zagrożenia łapaniami w górnictwie.

Literatura – References

1. Mendecki A.J. 1996: Seismic monitoring in mine, Chapman & Hall, London
2. Leśniak A., Isakow Z. 2009: Space-time clustering of seismic events and hazard assessment in the Zabrze - Bielszowice coal mine, Poland, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Elsevier, 46/5, pp. 918-928.
3. 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.
4. 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 INGENEO, Instytut Technik Innowacyjnych ITI EMAG, ISBN 978-83-63674-27-4, str. 1-156.
5. Dębski W. 2010: Seismic Tomography by Monte Carlo Sampling, Pure. Appl. Geophys. vol.167, pp. 131-152.
6. Kozłowski B., Polak Z., Prokop P. 2014: Wyrzuty gazów i skał, Wydawnictwo Śląsk, str. 652.
7. Almon 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,.
8. Instrukcja obsługi „Młot pneumatyczny typu PS-80” firmy OLI.

Pneumatic Seismic Source for Monitoring Velocity Changes of Seismic Waves in Underground Coal Mining Conditions

In the article, the concept and the first test of the seismic source WBZ Type 2 were presented. The idea is to construct the seismic source tailored for underground measurement requirements, including intrinsically safety demand. The source will be triggered every few minutes or less, which gives the ability to track seismic velocity changes with high accuracy in time. Quasi-continuous measurement allows to monitor stress field changes, and in consequence, reduce the hazard of rockburst. The WZB type 2 will be compatible with the ARES-5/E seismic system.

Keywords: seismic source, seismic hazard in mine, rockburst, mining-induced seismic events, seismic monitoring system