

## Roman WYŻGOLIK

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI,  
ZAKŁAD SYSTEMÓW POMIAROWYCH

# Nowoczesny system rejestracji zjawisk sejsmicznych w kopalniach węgla kamiennego

Dr inż. Roman WYŻGOLIK

Pracę doktorską obronił w 2003 r. na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Obecnie zatrudniony jest na stanowisku adiunkta w Instytucie Automatyki. Jego zainteresowania koncentrują się wokół zagadnień związanych z inteligentnymi przetwornikami pomiarowymi, systemami pomiarowymi, przetwarzaniem danych pomiarowych, programowaniem w LabVIEW. Jest członkiem Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach.



e-mail: roman.wyzgolik@polsl.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki prac, jakie prowadzone są przez autora<sup>1</sup> od kilku lat, nad rozwojem metod wykrywania początku sygnału sejsmicznego w oparciu o analizę falkową oraz rozwoju cyfrowego systemu rejestracji zjawisk sejsmicznych.

**Słowa kluczowe:** analiza falkowa, sejsmika górnicza, systemy pomiarowe.

## Modern acquisition system for seismic events in coal mines – event detection, measuring system

### Abstract

In the paper, the results of investigation of identification methods of the seismic signal first time arrival, based on wavelet analysis as well as development of the digital system for acquisition of the seismic events are presented. The paper summarizes the years of the author activity on this topic.

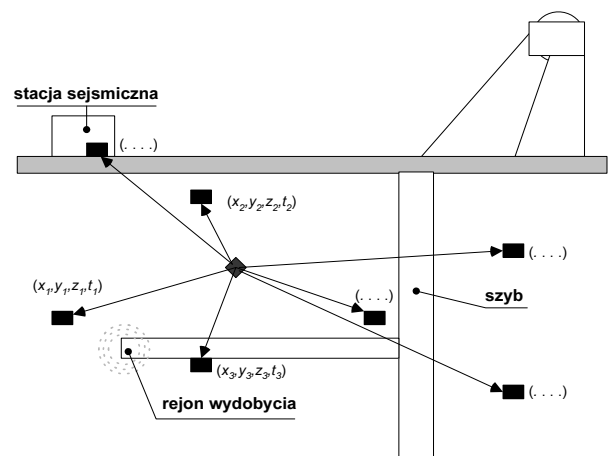
**Keywords:** wavelet analysis, coal mine seismicity, measuring systems.

## 1. Wstęp

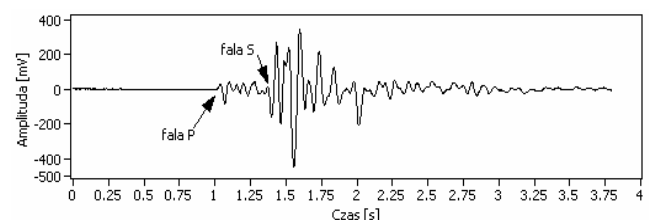
Eksploatacja górnicza wiąże się z występowaniem różnorodnych zagrożeń, których wykrywanie i przewidywanie można oprzeć na badaniach geofizycznych. Dominującym problemem jest powstawanie naprężeń w rejonie eksploatacji, co stwarza zagrożenie w postaci możliwości pojawienia się silnego wstrząsu czy tąpnięcia. Ponieważ zagadnienie przewidywania tego typu zjawisk nie zostało do końca rozwiązane, istnieje konieczność ciągłego monitorowania stanu górotworu (mas skały i ziemi nad wyrobiskiem). Monitoring polega między innymi na rejestracji zjawisk sejsmicznych, wywołanych naprężeniami i mikropęknięciami w górotworze, które są źródłem sygnałów sejsmicznych, rejestrowanych w postaci sejsmogramów. Nasłuch prowadzi się w sposób ciągły, zaś rejestruje się zjawiska o energii przekraczającej pewną, ustaloną wartość. Sygnały zarejestrowane dla tych zjawisk poddaje się następnie przetwarzaniu w celu określenia parametrów zjawiska, między innymi lokalizacji jego ogniska oraz oceny energii. Uproszczony schemat prezentujący problem pokazano na rys. 1.

Tąpnięcia stanowią jedno z największych zagrożeń występujących w kopalniach głębinowych. W celu oceny stopnia zagrożenia tąpnięciami, wykorzystywane są metody analityczne i stochastyczne bazujące na zapisach zjawisk sejsmicznych, rejestrowanych w kopalnianych stacjach tępni [1, 2]. Zjawiska te, rejestrowane są przez specjalne czujniki, zamieniające drgania mechaniczne podłoża do którego są przytwierdzone, na sygnał elektryczny – naj-

częściej napięciowy. Powszechnie wykorzystuje się do tego celu sejsmometry, które są czujnikami prędkości przemieszczenia. W ostatnim czasie coraz popularniejsze stają się sejsmiczne czujniki przyspieszenia – akcelerometry, które ze względu na swoją konstrukcję umożliwiają łatwą budowę stanowisk trójskładowych. Sygnały z tych czujników zapisywane są w aparaturze rejestrującej i poddawane dalszej analizie. Przegląd stosowanej aparatury pomiarowej znaleźć można w [3], zaś w [4] zawarto szczegółowy opis propozycji cyfrowego systemu rejestracji wstrząsów. Przykładowy sejsmogram, z zaznaczonym pierwszym wejściem fali P oraz S pokazano na rys. 2.



Rys. 1. Zjawisko sejsmiczne i jego detekcja w sieci sejsmometrów  
Fig. 1. Seismic event and its detection in seismic system



Rys. 2. Przykładowy sejsmogram, z wyraźnie widocznymi pierwszymi wejściami fal P oraz S

Fig. 2. An example of the seismogram with clearly visible P and S waves

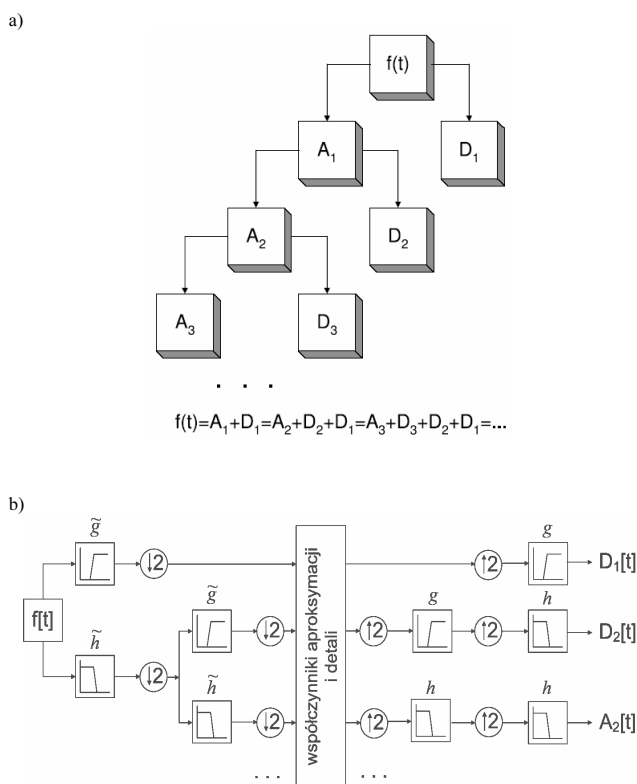
Fala P, podłużna, jako że jej czoło przesuwa się równoległe do kierunku ruchu, podczas gdy fali poprzecznej S prostopadle, ma większą prędkość rozchodzenia się, przez co pojawia się w zapisie jako pierwsza. Takie rozdzielanie się fal możliwe jest, gdy czujnik znajduje się w wystarczającej odległości od źródła emisji. Zasadniczo do lokalizacji zjawiska sejsmicznego wykorzystać można czasy pierwszych wejść obu fal – wykorzystuje się wówczas metodę różnicy czasów wejścia fali P i S. Metoda ta daje dobre rezultaty, gdy zjawisko sejsmiczne zarejestrowane zostało na stanowiskach trójskładowych. Możliwe jest wtedy wyznaczenie pierwszego wejścia fali S z większą precyzją, co najczęściej nie jest możliwe dla zapisów jednoskładowych. Metody detekcji fal P i S w zapisach trójskładowych opisane zostały w pracach [5] oraz [6]. Podjęto również próby zastosowania do tego celu analizy falkowej [7, 8].

<sup>1</sup> Część prac, ta związana z rozwiązaniami sprzętowymi, prowadzona jest przy współudziale dr inż. Janusza Kozy z KWK Wujek w Katowicach oraz mgr inż. Adama Augustyniaka z firmy Sterlab w Katowic.

## 2. Wykrywanie początku sygnału sejsmicznego

Dokładność lokalizacji ogniska zjawiska sejsmicznego w dużej mierze zależy od precyzji wyznaczenia czasów pierwszych wejść fal P w zarejestrowanych sejsmogramach. Ma to istotne znaczenie dla bezpieczeństwa załogi, w przypadku zjawisk sejsmicznych zlokalizowanych w rejonie wydobywania. W ocenie tych czasów geofizyk wspomagany jest przez algorytm automatycznej detekcji, zaimplementowany w programie obsługującym sieć sejsmometrów. Algorytm ten bardzo dobrze spełnia swoje zadanie w przypadku zjawisk, dla których zarejestrowane sejsmogramy mają odpowiednio dużą amplitudę - wówczas pierwsze wejście fali P jest wyraźne, natomiast w przypadku zapisów o małej amplitudzie, poziom szumu jest na tyle wysoki, że skutecznie utrudnia automatyczną detekcję pierwszego wejścia fali.

Istnieje wiele metod, na których bazują algorytmy automatycznej detekcji pierwszego wejścia fali P w sygnale sejsmicznym. Metody te są powszechnie znane i ich opis znaleźć można w literaturze [9, 10, 11, 12]. W praktyce metody te są modyfikowane do istniejących potrzeb tak, aby uzyskać ich optymalną skuteczność. Algorytmy bazujące na tych metodach rzadko są udostępniane, gdyż są chronione przez firmy produkujące aparaturę do rejestracji i lokalizacji zjawisk sejsmicznych.



Rys. 3. Analiza wielorozdzielcza: a) dekompozycja sygnału na aproksymacje  $A_i$  oraz detale  $D_i$ , b) sposób otrzymywania aproksymacji i detali z wykorzystaniem banków filtrów dekompozycji i rekonstrukcji,  $\tilde{g}, \tilde{h}$  to odpowiednio górno- i dolnoprzepustowy filtr dekompozycji, zaś  $g, h$  odpowiadające im filtry rekonstrukcji

Fig. 3. Multiresolution analysis: a) signal decomposition to approximations  $A_i$  and details  $D_i$ , b) Method of approximation and details calculation with decomposition and reconstruction filter banks,  $\tilde{g}, \tilde{h}$  are high- and lowpass decomposition filters respectively,  $g, h$  are corresponding reconstruction filters

W pracach własnych zaproponowano do detekcji pierwszego wejścia fali P analizę falkową [13, 14, 15]. Przeanalizowano możliwości wykorzystania dyskretnej postaci tej metody, zwanej analizą wielorozdzielczą (spotyka się również nazwę analiza

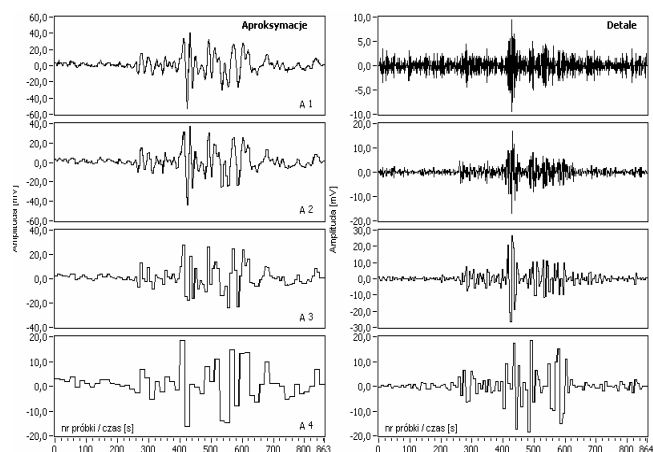
wieloskalowa [16]). Metoda ta jest szczególnie użyteczna w przypadku zapisu sygnałów sejsmicznych o małych amplitudach i silnie zaszumianych. W takich zapisach pierwsze wejście fali sejsmicznej może być na tyle niejednoznaczne, że nawet geofizyk pracujący w kopalnianej stacji tapani ma problemy z poprawnym jego określeniem. Zwykle takie sygnały są odrzucane.

Wykorzystanie w przetwarzaniu sygnału analizy wielorozdzielczej, umożliwiła przedstawienie analizowanego sygnału w postaci sumy jego reprezentacji zgrubnej i szczegółowej, na wielu poziomach rozdzielczości, jak to przedstawiono na rys. 5a. Reprezentacja zgrubna nazywana jest aproksymacją sygnału na danym poziomie rozdzielczości, zaś reprezentacja szczegółowa – detalami na danym poziomie rozdzielczości.

Proces uzyskiwania aproksymacji i detali, pokazany na rys. 3b, jest dwuetapowy. Wykorzystywane są banki filtrów dolno- i górnoprzepustowych dekompozycji i rekonstrukcji, stworzone w oparciu o daną falkę i stowarzyszoną z nią funkcję skalującą. Pominięte zostaną tu wzory opisujące odpowiednie zależności pomiędzy tymi funkcjami oraz wiążące ze sobą obie grupy filtrów. Zależności te znaleźć można w podanych w spisie literatury pozycjach na temat falek, w szczególności [17].

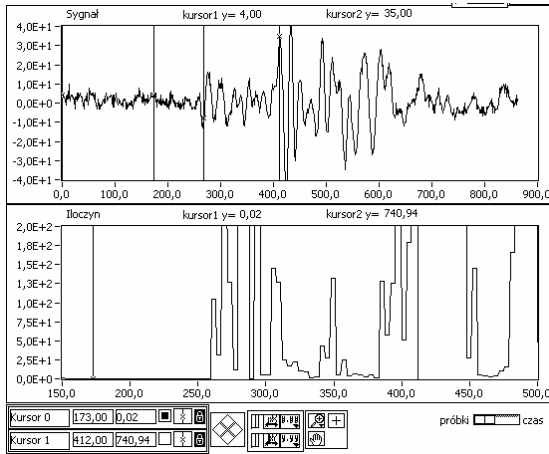
Ponieważ w detalach, z reguły na pierwszych dwóch poziomach dekompozycji, silnie objawia się szum występujący w sygnale, można je pominąć w procesie odtwarzania sygnału. W odniesieniu do rys. 3a można zamiast procedury  $f[t]=A_3+D_3+D_2+D_1$  zastosować następujące sumowanie:  $f^*[t]=A_3+D_3+D_2$ , pomijając detale z poziomu pierwszego, które zawierają najwięcej szumu. Jest to dość radykalny sposób redukcji szumu jaki można przeprowadzić przed samą procedurą detekcji pierwszego wejścia fali P. W praktyce lepiej jest stosować wstępną filtrację dolnoprzepustową lub też filtrację opartą na analizie falkowej. Zaletą podejścia falkowego jest fakt redukcji szumów w całym paśmie częstotliwości – stosowane metody eliminacji progowej działają na detalach ze wszystkich poziomów dekompozycji.

Do detekcji pierwszego wejścia wykorzystano detale uzyskane w procesie analizy wielorozdzielczej. Zauważyć można mianowicie, iż pojawienie się sygnału sejsmicznego skutkuje wzrostem amplitudy detali na poszczególnych poziomach dekompozycji. Dobre rezultaty otrzymuje się przemnażając przez siebie moduły detali z wybranych poziomów dekompozycji. Do dekompozycji sygnału, wykorzystano falkę Haara, która ma najbardziej zwarty nośnik spośród znanych falek, dana jest też w postaci analitycznej. Przykład dekompozycji sygnału sejsmicznego pokazano na rys. 4. Widać dużą zawartość szumu w detalach na pierwszym poziomie dekompozycji, stąd w procedurze detekcji pierwszego wejścia fali P, której rezultat pokazany jest na rys. 5, zostały one pominięte.



Rys. 4. Dekompozycja sygnału sejsmicznego o małej amplitudzie na aproksymacje i detale, wykorzystano falkę Haara

Fig. 4. Signal decomposition of low – amplitude seismic signal to approximation and details, Haar wavelets have been used

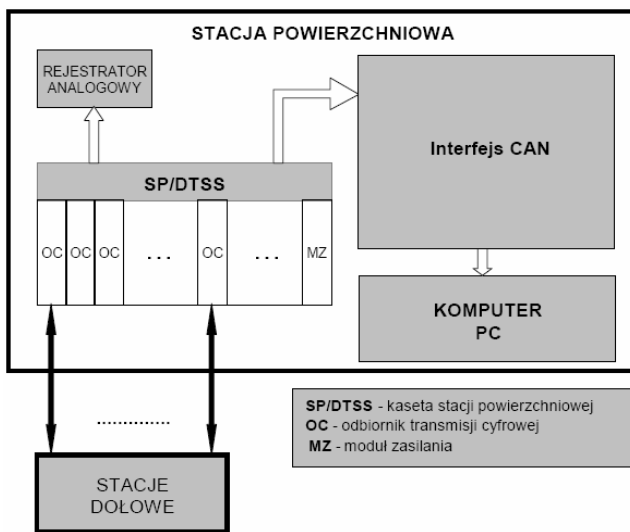


Rys. 5. Rezultat detekcji pierwszego wejścia fali P – wykorzystano detale z poziomów 2, 3 i 4

Fig. 5. An example of the P phase arrival time detection – details from 2, 3 and 4th levels have been used

### 3. Rozwój cyfrowego systemu rejestracji zjawisk sejsmicznych

W obecnie stosowanej w kopalniach węgla kamiennego aparaturze najlepsza dynamika przetwarzania wynosi około 100dB. Aby zapewnić taką dynamikę, konieczne było stworzenie systemu rejestracji zjawisk sejsmicznych z cyfrową transmisją danych. Trzeba zdawać sobie sprawę z tego, że sygnały przesyłane są na znaczne odległości – do 10km. W przypadku starszych systemów, z transmisją analogową, dynamika toru transmisyjnego znacznie ograniczała możliwość uzyskania wymaganej rozdzielczości przetwarzania. Ponadto spełnić należy rygorystyczne warunki dotyczące pracy urządzeń w strefach zagrożonych wybuchem. W oparciu o pracę [10] jak i późniejsze opracowania, w Centrum EMAG stworzono system z cyfrową transmisją danych – Aramis DTSS. Schemat blokowy tego systemu, w wersji zmodyfikowanej, pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Struktura sytemu rejestracji zjawisk sejsmicznych Aramis-DTSS  
Fig. 6. Structure of the Aramis-DTSS seismic event acquisition system

Korzyści płynące z systemu cyfrowego leżą głównie w zachowaniu jednorodności próbkowanych danych sejsmicznych. Dodatkowo, wszystkie stacje dołowe synchronizowane są zegarem GPS z dokładnością do 100ns.

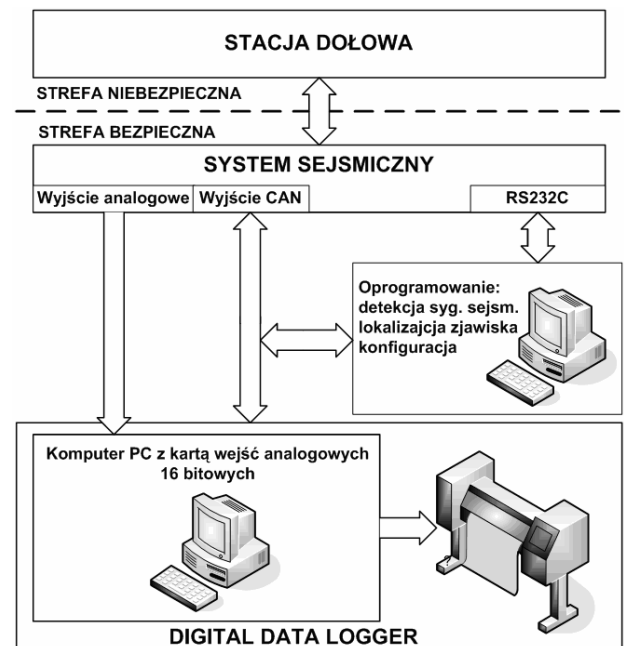
Zjawiska sejsmiczne przetwarzane są z rozdzielczością 16-bitową w stacjach dołowych i transmitowane są do stacji po-

wierzchniowej, podłączonej do komputera PC z oprogramowaniem do detekcji i lokalizacji zjawisk sejsmicznych. Zarejestrowane zjawiska mogą być dodatkowo wydrukowane na rejestratorze.

We współpracy z partnerami z KWK „Wujek” oraz firmą Sterlab z Katowic, stworzono prototyp zintegrowanego systemu rejestracji zjawisk sejsmicznych, pokazany na rys. 7. Jego istotnym i najnowszym elementem jest cyfrowy rejestrator graficzny.

### 3.1. Cyfrowy rejestrator graficzny

W stacjach geofizyki górniczej stosowano dotychczas rejestratory graficzne typu N338 produkcji radzieckiej lub „Oscillomink” firmy Siemens. Rejestracja zapisu wstrząsu następowała po detekcji zjawiska przez aparaturę PCMG3 produkcji „Geopan” lub Sylok produkcji Emag. Inne aparaty jak DTSS produkcji Emag lub LKZ produkcji GIG nie posiadały bezpośredniego wyjścia sygnału analogowego na rejestrator graficzny.



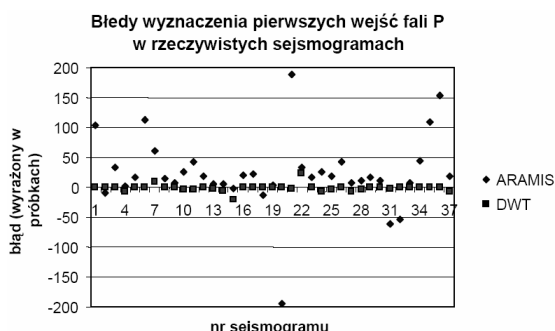
Rys. 7. Zintegrowany system rejestracji zjawisk sejsmicznych  
Fig. 7. Seismic system with the new digital data logger. The CAN interface is for future version of the seismic system

Zastosowano rozwiązanie polegające na połączeniu dowolnego systemu transmisji (źródło sygnału może być analogowe lub cyfrowe) z komputerem typu PC oraz drukarką. W komputerze zastosowano nowoczesną kartę akwizycji sygnałów analogowych firmy National Instruments. Program sterujący posiada wiele opcji, które umożliwiają wizualizację zapisów wstrząsów na ekranie jak również zapis w trybie on-line na kolorowej drukarce. Prędkość zapisu jest regulowana dowolnie, domyślnie wynosi 25mm/s. Został zastosowany bardzo czuły algorytm wykrywania zjawisk sejsmicznych z korekcją składowej stałej i z programowanymi parametrami poziomu detekcji zjawisk sejsmicznych. Możliwość strojenia parametrów z interfejsu graficznego umożliwia wykrywanie mikropełnięć i wstrząsów śladowych. Zjawiska sejsmiczne są zapisywane na dysku w katalogach dziennych. Dodatkowo sygnały, których amplituda przekracza zadany poziom dyskryminacji, są drukowane na drukarce wraz z opisem zjawiska, tj. datą i czasem wystąpienia oraz czasem trwania. Możliwa jest również lokalizacja zjawisk.

Prezentowany system posiada budowę otwartą – jest możliwe dołączenie sygnałów cyfrowych z dowolnej aparatury cyfrowej a w szczególności aparatury z interfejsem CAN w który ma być wyposażony wspomniany wcześniej system DTSS.

#### 4. Podsumowanie

Do detekcji pierwszego wejścia fali P w zarejestrowanych sygnałach sejsmicznych wykorzystano podejście falkowe, które może być szczególnie użyteczne w przypadku detekcji pierwszego wejścia fali P w sygnałach zasumionych oraz o małej amplitudzie. Wyniki testowano na sygnałach rzeczywistych, pochodzących głównie z Kopalni Węgla Kamiennego „Wujek”. Analizie poddano sygnały typowo rejestrowane i wykorzystywane do lokalizacji ogniska zjawiska sejsmicznego jak i te, których mała amplituda, a co za tym idzie duży poziom szumów, powodowały odrzucenie ich do dalszego przetwarzania. Badania porównawcze z metodą stosowaną w aparaturze kopalnianej (ARAMIS) przeprowadzono dla wybranych sejsmogramów o dużym zasumieniu i małej amplitudzie. Uzyskane momenty pierwszych wejść fal P były następnie weryfikowane przez geofizyka pracującego w kopalnianej stacji tapani. Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 8. Uzyskane rezultaty były zadowalające. Należy jednak nadmienić, że ostateczną decyzję zawsze podejmuje doświadczony geofizyk, a proponowana metoda może jedynie wspomagać go w podejmowaniu decyzji.



Rys. 8. Różnice w wyznaczeniu pierwszych wejść fal P proponowaną przez autora metodą (DWT) oraz metodą porównawczą (ARAMIS) a pierwszymi wejściami wyznaczonymi przez geofizyka

Fig. 8. Differences between first time arrival of the P wave for wavelet analysis approach, currently used algorithms (ARAMIS) and given by a geophysicist as a reference

Jeśli idzie o rozwój systemów rejestracji zjawisk sejsmicznych to główne udoskonalenia istniejącego systemu polegały na ustanowieniu magistrali wewnętrznej powierzchniowego systemu, w postaci wprowadzenia magistrali CAN 2.0B do modułów powierzchniowych (moduły OC na rys. 6) oraz opracowaniu cyfrowego rejestratora graficznego.

#### 5. Literatura

- [1] Cianciara B., Cianciara A., Dworak M.: Wybrane zagadnienia oceny zagrożeń tapaniami – funkcja ryzyka. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, nr 9–10, 1995, ss. 93–97.
- [2] Cianciara B., Cianciara A., Isakow Z.: Modele źródeł emisji sejsmicznej w warunkach górnictwa podziemnego. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, nr 6–7, 1997, ss. 149–153.
- [3] Isakow Z., Cianciara B.: Wkład centrum EMAG w rozwój systemów do oceny zagrożenia tapaniami oraz kontroli oddziaływania eksploatacji podziemnej na powierzchnię obszaru górniczego. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, nr 9–10, 2000, ss. 146–159.
- [4] Koza J.: Sposób pomiaru parametrów fal sejsmicznych w oparciu o urządzenie koncentrujące informacje połączone z maszyną cyfrową. *Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Instytut Automatyki*, 1991.
- [5] Cichowicz A.: An automatic s-phase picker. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 83, 1993, pp. 180–189.
- [6] Wang J., Teng T.: Identification and picking of s phase using an artificial neural network. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 87, 1997, pp. 1140–1149.
- [7] Anant K. S., Dowl F. U.: Wavelet transform methods for phase identification in three-component seismograms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 87(6), 1997, pp. 1598–1612.
- [8] Oonincx P. J.: Automatic phase detection in seismic data using the discrete wavelet transform. *Report PNA-R9811, Centrumvoor Wiskunde en Informatica, Netherlands*, 1998.
- [9] Allen R.: Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 68(5), 1978, pp. 1521–1532.
- [10] Allen R.: Automatic phase pickers: their present use and future prospects. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 72(6), 1982, pp. 225–241.
- [11] Cichowicz A., Kopystyński L.: Algorithm for the determination of the first approach of P-wave. *Publs. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sci.*, Vol. 96, 1975, pp. 121–130.
- [12] Joswig M.: Pattern recognition for earthquake detection. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 80(1), 1990, pp. 170–186.
- [13] Wyżgolik R.: Analiza falkowa w aproksymacji sygnałów sejsmicznych o małych amplitudach. *Publs. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sci.*, tom M-24(340), 2002, ss. :81–93.
- [14] Wyżgolik R.: Determination of P phase arrival in low-amplitude seismic signals from coal-mines with wavelets. *Proceedings of EUSIPCO'2002*, vol. 3, pp. 363–366.
- [15] Wyżgolik R.: Wykorzystanie metod analizy falkowej do detekcji pierwszego wejścia składowej pionowej sygnału sejsmicznego. *Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Instytut Automatyki*, 2003.
- [16] Wojtaszczyk P.: *Teoria Falek*. PWN S.A, Warszawa, 2000.
- [17] Mallat S.: *A Wavelet Tour of Signal Processing*, second edition. Academic Press, London, 1999.

Artykuł recenzowany

#### INFORMACJE

**Zapraszamy do publikacji artykułów naukowych  
w czasopiśmie PAK**

**WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA**  
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa,  
tel./fax: 022 827 25 40

**Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA**  
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,  
tel./fax: 032 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl