

Nowoczesny system LOFRES niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej

Modern system LOFRES for low frequencies passive seismics



*Dr inż. Zbigniew Isakow,
prof. nadzw. Instytutu EMAG**



*Dr hab. inż. Zenon Pilecki,
prof. IGSMiE PAN**)*



*Mgr inż. Przemysław Sierodzki***)*

Treść: W artykule przedstawiono system LOFRES przeznaczony do badań metodą niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej przy powierzchniowych warstwach geologicznych z wykorzystaniem szumu sejsmicznego. Scharakteryzowano systemy pomiarowe stosowane w polskich kopalniach przydatne do pomiarów sejsmiki pasywnej. Opisano budowę i działanie systemu LOFRES. Przedstawiono parametry techniczne i testy zastosowanych sejsmometrów. Podkreślono pozytywne wyniki testów modelowego systemu. Omówiono przewidywane sposoby wykorzystania systemu.

Abstract: This paper presents an innovative LOFRES system, designed for research of subsurface geological strata, using the method of low frequency passive seismics based on seismic noise registration. Measurement systems used in Polish mines useful for passive seismic measurements have been characterized. The construction and operation of the LOFRES system have been also described. Specification and tests of the applied seismometers were presented. Positive results of the tests of a model system were highlighted. Potential applications of the system were discussed.

Słowa kluczowe:

system LOFRES, niskoczęstotliwościowa sejsmika pasywna, mikrosondowanie sejsmiczne, interferometria sejsmiczna, szum sejsmiczny, sejsmometr

Key words:

LOFRES system, low frequency passive seismics, microseismic sounding, seismic interferometry, seismic noise, seismometer

1. Wprowadzenie

Aktualnie w kraju brak jest systemu umożliwiającego prowadzenie badań metodą niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej LFS (ang. *Low Frequency Seismics*). W świecie zagadnienie to jest stosunkowo nowe i rozwiązywane jest wycinkowo przez różne zespoły badawcze [1, 7, 8].

Rozwój metod LFS byłby niemożliwy gdyby nie nowoczesne technologie wykorzystywane w produkcji szerokopasmowych czujników oraz wzrost mocy obliczeniowej komputerów poprzez stosowanie obliczeń równoległych. W metodzie LFS wykorzystuje się wielogodzinne zapisy danych, co wymusza tworzenie nowych aplikacji, zarówno do rejestracji, przetwarzania, jak i interpretacji danych. Należy zauważyć wzrost

zainteresowania jednostek naukowych na świecie metodą LFS oraz oferowanie pierwszych usług badawczych [1]. Rozwija się również rynek autorskiego oprogramowania.

Przedstawiony w pracy system LOFRES jest nowatorskim systemem pomiarowym niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej LFS do badania budowy i właściwości przypowierzchniowych warstw ośrodka geologicznego. System ten, ze względu na funkcje pomiarowe, jest przystosowany do badań dwoma metodami LFS: sondowaniem mikroesejsmicznym MS (ang. *microseismic sounding*) i interferometrią sejsmiczną IS (ang. *seismic interferometry*) [8].

System można wykorzystać do rozpoznania budowy ośrodka geologicznego, a zwłaszcza stopnia jego zniszczenia. Wiedza taka jest często niezbędna dla posadowienia różnego rodzaju obiektów budowlanych wielkopowierzchniowych, a także tuneli, lotnisk, szlaków komunikacyjnych, obwałowań, obiektów i zbiorników hydrotechnicznych czy osiedli mieszkaniowych. Na terenach czynnej i dokonanej eksploatacji górniczej system może wspomagać ocenę zagrożenia

*) Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, **) Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, ***) Zakład Badawczo-Naukowy, Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG

powierzchni skutkami deformacji ciągłych i nieciągłych oraz umożliwi wybór optymalnej i skutecznej metody ich rewitalizacji. System wykorzystany może być również do rozpoznania stopnia naruszenia górotworu w rejonach zagrożonych sejsmicznością indukowaną, a zwłaszcza wystąpieniem bardzo silnych wstrząsów tektonicznych o charakterze regionalnym, oddziaływujących destrukcyjnie na powierzchnię terenu. System może być również przydatny do monitorowania stopnia wyeksploatowania różnego rodzaju złóż, np. ropy naftowej, gazu, soli kamiennej, siarki metodą podziemnego wytopienia itp.

System LOFRES został zrealizowany w ramach projektu badań stosowanych PBS2 dofinansowanego przez NCBiR w konsorcjum Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG, Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk oraz Centrum Transferu Technologii EMAG zainteresowane komercjalizacją.

2. Systemy sejsmiki pasywnej w polskich kopalniach

Stosowane w polskim górnictwie w kopalniach węgla kamiennego systemy sejsmiczne, takie jak AMAX, ARAMIS M/E zostały opracowane w Głównym Instytucie Górnictwa oraz Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG. Systemy te umożliwiają lokalizację zjawisk sejsmicznych oraz wyznaczenie parametrów ognisk wstrząsów. Znajomość parametrów sejsmicznych oraz geometrii sieci pomiarowej umożliwia stosowanie różnych algorytmów prędkościowej i tłumieniowej tomografii pasywnej. W algorytmach tomografii wykorzystuje się naturalne zjawiska sejsmiczne wywoływane eksploatacją górnictwem. Oprogramowanie systemów w GIG [4] oraz w EMAG [2] realizowane są w trybie off-line. System opracowany w ITI EMAG ma oprogramowanie do tomografii pasywnej metodą inwersji probabilistycznej udostępnione w ramach licencji przez W. Dębskiego z Instytutu Geofizyki PAN [2] i włączone do oprogramowania HESTIA [3, 5, 9]. Wiarygodność uzyskiwanych wyników w dużym stopniu uzależniona jest od liczby wstrząsów i ich przestrzennego rozkładu.

W zakładach górniczych rud miedzi KGHM Polska Miedź stosowane jest również oprogramowanie do tomografii pasywnej z Instytutu Geofizyki PAN i współpracujące z systemem LITOS (udzielona licencja).

Systemy i ich oprogramowanie stosowane w górnictwie umożliwiają tworzenie map izolinii prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej w górotworze. W przypadku synchronicznej w czasie rejestracji silniejszych zjawisk na dole kopalni i na powierzchni, co zapewniają systemy ARAMIS M/E i ARP 2000 P/E [5] możliwa jest również tomografia pasywna w górotworze od poziomu wyrobiska do powierzchni.

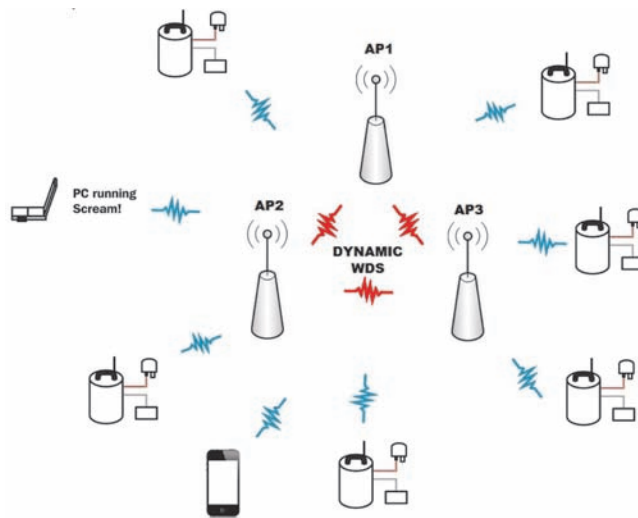
3. Opis systemu LOFRES

3.1. Budowa systemu

Opracowywany w ramach projektu niskoczęstotliwościowy system pomiarowy LOFRES cechuje się rozproszoną strukturą przedstawioną na rysunku 1. System składa się z zestawu mobilnych, autonomicznych, trójskładowych stacji pomiarowych drgań, rozmieszczanych w różnych miejscach na powierzchni terenu, w węzłach linii lub siatki pomiarowej. Rejestrują one synchronicznie w czasie prędkości trzech składowych drgań gruntu za pomocą wchodzących w ich skład niskoczęstotliwościowych sejsmometrów. Dane zapisywane są w wewnętrznej, nieulotnej pamięci czujników o dużej

pojemności, rzędu kilkunastu GB. Synchronizację czasu zapewnia dołączony do każdego czujnika odbiornik GPS. Każdy czujnik pomiarowy wyposażony jest w system transmisji bezprzewodowej w standardzie Wi-Fi oraz zewnętrzny akumulator zasilający z możliwością jego doładowania lub zamiany. Dodatkowo z odbiornika GPS w każdym czujniku dostępne są dane o jego współrzędnych X, Y i Z z dokładnością $\pm 3\text{m}$, wystarczającą do lokalizacji w algorytmach przetwarzających. Znajomość położenia czujnika ułatwia również jego identyfikację podczas przebudowy systemu. Dla umożliwienia niezawodnej pracy czujników systemu w rozległym terenie przewidziano zastosowanie autonomicznych punktów dostępowych API z własnym zasilaniem, pracujących w trybie WDS (ang. *Wireless Distribution System*) zwiększających zasięg transmisji Wi-Fi i niezależających go od ukształtowania i zabudowy terenu. Każdy z czujników systemu LOFRES pracować może w trybie rejestracji ciągłej i jednocześnie wykrywania i rejestracji większych zjawisk sejsmicznych zgodnie z zadanym kryterium. Odpowiednie oprogramowanie komunikacyjne w mobilnym serwerze rejestrującym system umożliwia konfigurację czujników, podgląd zarejestrowanych zjawisk oraz parametrów charakteryzujących pracę czujnika, np. odchylenie czujnika od poziomu, temperaturę oraz jakość synchronizacji czasu. Nowoczesne czujniki posiadają wewnętrzny kalibrowany wzбудnik umożliwiający dokonywanie okresowo autokalibracji wszystkich składowych pomiarowych.

Możliwy jest również podgląd wybranych parametrów czujnika na ekranie mobilnego PDA z wykorzystaniem bezprzewodowej sieci pomiarowej, co jest szczególnie przydatne podczas instalacji, przebudowy i nadzoru systemu.



Rys. 1. Rozproszona struktura systemu LOFRES

Fig. 1. Dissipated structure of LOFRES system

System posiada bezprzewodową transmisję danych oraz możliwość zdalnego podglądu konfiguracji i rejestrowanych danych.

3.2. Czujniki drgań

System LOFRES posiada trójskładowe czujniki - sejsmometry firmy Güralp CMG-6TD i opcjonalnie CMG-6T, zastosowane głównie ze względu na oferowany w wersji CMG-6TD wbudowany rejestrator rozwiązujący kompleksowo zagadnienie rejestracji, archiwizacji i przekazywania danych przy stosunkowo małym poborze mocy. Sejsmometry

Tabela 1. Porównanie danych technicznych sejsmometrów CMG-6TD i CMG-6T firmy GÜRALP
Table 1. Comparison of technical data of GÜRALP seismometers CMG-6TD and CMG-6T

Parametr	CMG-6TD	CMG-6T
Pasma częstotliwości	30s – 100Hz	30s – 100Hz
Czułość	2 x 1200 Vs/m	2 x 1200 Vs/m
Wyjście	±10 V (20 V peak-to-peak)	±10 V (20 V peak-to-peak)
Odporność międzykanałowa	> 60dB	> 65dB
Liniowość	> 95dB	> 90dB
Poziom szumu	-147 dB (rel. 1m2s-4Hz-1)	-172 dB (rel. 1m2s-4Hz-1)
Format danych	GCF przez RS232, Firewire, Ethernet lub Wi-Fi	n.d
Próbkowanie	1000 – 1 próbki/s	1000 – 1 próbki/s
Rozdzielczość dla 1 próbki/s	21 bitów	n.d
Pamięć wewnętrzna	16 GB Flash	n.d
Pobór mocy	65mA/12V	38mA/12V
Napięcie zasilania	10 – 36V DC	10 – 36V DC
Temperatura pracy	-40 to +65°C	-40 to +75°C
Wymiary	Ø154mm x 207mm	Ø154mm x 207mm
Obudowa	Anodyzowane aluminium	Anodyzowane aluminium
Masa	2.7 kg (system <4.1kg)	2.49 kg

posiadają zintegrowany przetwornik AC, układ rejestrujący oraz synchronizację czasu GPS. Są przystosowane do montażu na powierzchni i w gruncie. Dodatkowo posiadają system łączności Wi-Fi pozwalający na bezprzewodowy podgląd pracy urządzeń oraz pobieranie danych do serwera [6]. Oprogramowanie czujnika Scream! pozwala na jego samodzielną pracę lub zdalnie sterowaną przez różne interfejsy. Dla zwiększenia liczby czujników można zastosować opcjonalnie tańsze trójskładowe czujniki CMG-6T firmy Güralp pozabawione wewnętrznego rejestratora. Dostępne w nich wyjścia analogowe umożliwiają ich podłączenie do odpowiednio zmodyfikowanego standardowego systemu sejsmicznego ARAMIS M/E, wyposażonego w przewodową transmisję cyfrową trzech składowych po jednej linii teletechnicznej. Dane techniczne trójskładowych sejsmometrów CMG-6TD i CMG-6T przedstawiono w tabeli 1 [6]. Na rys. 2 i 3 przedstawiono czujnik CMG-6TD z osprzętem.

Znormalizowane charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe sejsmometru CMG-6TD dla dolnego zakresu rejestrowanych częstotliwości zamieszczono na rysunku 4. Są to dokumenty kalibracyjne (niekatalogowe – uzyskane z autokalibracji) potwierdzające ich parametry.



Rys. 2. Czujnik CMG-6TD firmy Güralp [6]
Rys. 2. Güralp sensor CMG-6TD [6]



Rys. 3. Zestaw transportowy dla czujników CMG-6TD firmy Güralp [6]

Rys. 3. Transport set for Güralp sensors CMG-6TD [6]

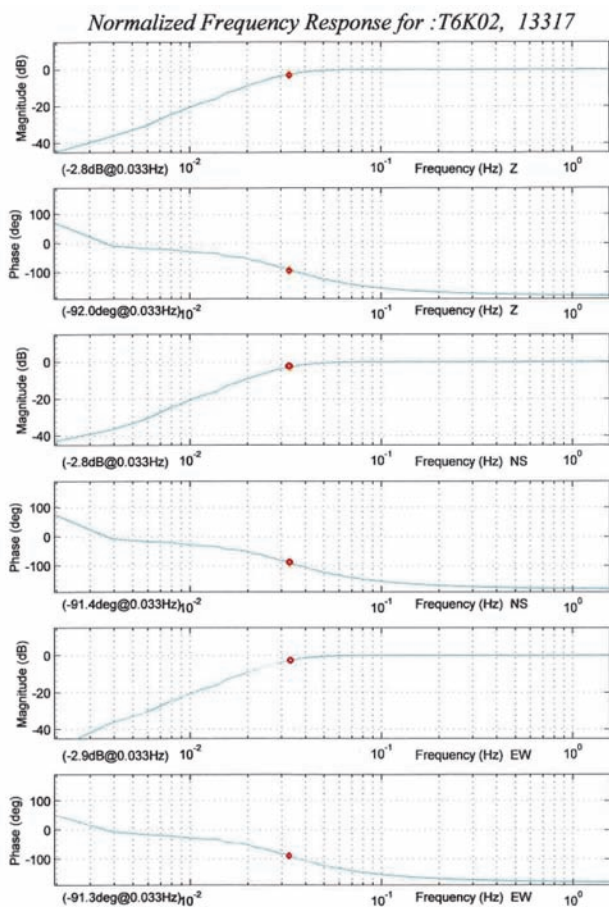
3.3. Funkcje systemu

W pracy systemu LOFRES, jak w większości systemów sejsmicznych, wyróżnić można 3 zasadnicze procesy: rejestracji (akwizycji), przetwarzania i interpretacji danych.

Z akwizycją danych związana jest geometria pomiaru. Rysunek 5 przedstawia przykład rozmieszczenia czujników na obszarze pomiarowym. Odległość między czujnikami i profilami pomiarowymi dl i dx jest uwarunkowana rozdzielczością poziomą i głębokością rozpoznania ośrodka.

System LOFRES standardowo będzie wyposażony w 12 czujników, w tym 11 trójskładowych czujników pomiarowych i 1 czujnik referencyjny.

Oprogramowanie systemu umożliwi dokonywanie pomiarów z wykorzystaniem metod sondowania mikrosejsmicznego i interferometrii sejsmicznej, dla potrzeb których opracowano odpowiednie algorytmy i oprogramowanie [8]. W metodzie sondowania sejsmicznego badania prowadzone są na kilku stanowiskach pomiarowych (minimum 3). Do interpretacji



Rys. 4. Przykład znormalizowanych charakterystyk amplitudo-częstotliwościowych sejsmometru CMG-6TD dla dolnego zakresu rejestrowanych częstotliwości
 Fig. 4. Example of normalized amplitude-frequency characteristics of the sensor CMG 6TD for the lower range of frequencies

służy głównie składowa pionowa szumu sejsmicznego, natomiast rejestracje z pozostałych składowych mogą posłużyć do lepszego rozeznania charakteru pola falowego i jego stacjonarności. Zapis odbywa się w każdym punkcie przez okres

co najmniej 1 godziny, tak aby uzyskać jego stacjonarność. Czujniki podczas pomiaru mogą być przemieszczane z punktu na punkt, z wyjątkiem bazy referencyjnej.

W metodzie interferometrii sejsmicznej zapis odbywa się w sposób ciągły z krokiem próbkowania dobranym dla konkretnego zadania. Im płytsze rozpoznanie tym krok próbkowania mniejszy. Zapis może być prowadzony z wykorzystaniem składowej pionowej fali powierzchniowej typu Rayleigha i/ lub poziomej fali Love'a. Długość zapisu uzależniona jest od: charakterystyki pola falowego badanego rejonu (dominującej częstotliwości, kierunku propagacji), rodzaju zadania (monitoring zmian, lokalizacja stref osłabienia, rozpoznanie budowy ośrodka itp.).

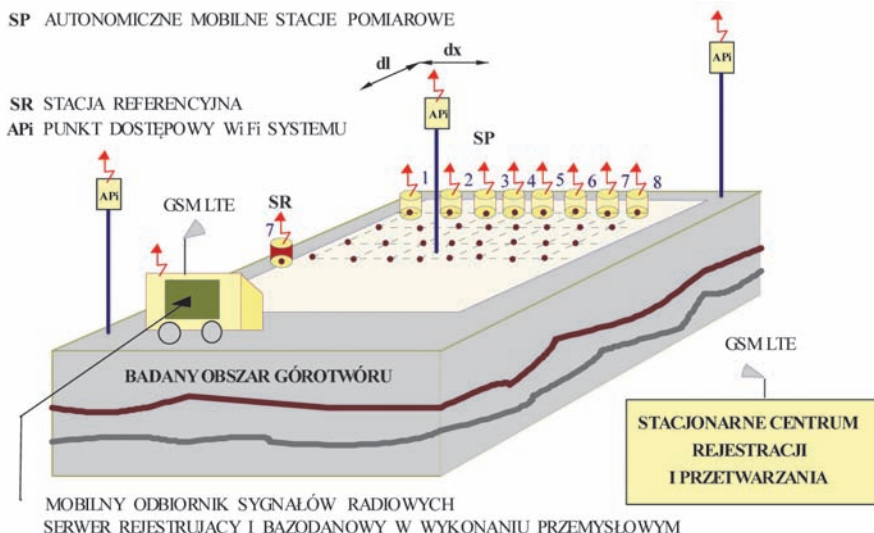
3.4. Oprogramowanie systemu

Oprogramowanie systemu sejsmicznego LOFRES składa się z kilku głównych bloków strukturalnych, pozwalających na realizację następujących funkcji:

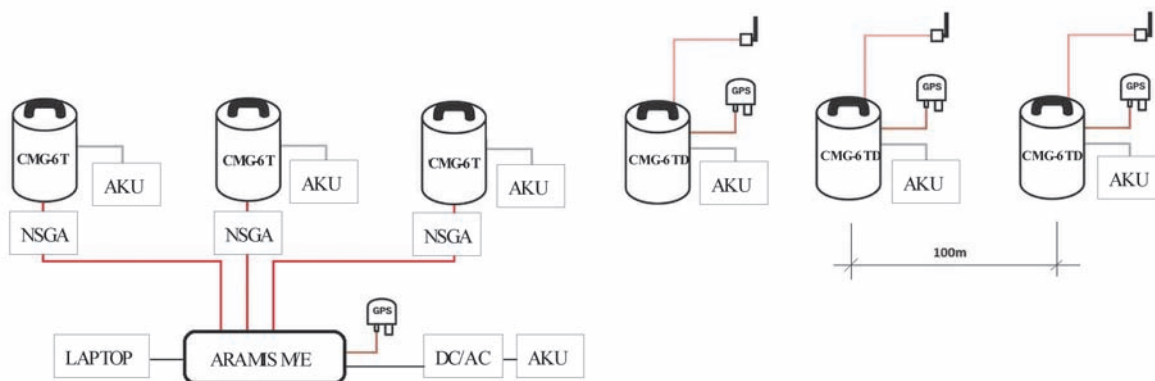
- akwizycja - rejestracja i archiwizacja danych pomiarowych,
- przetwarzanie wstępne - poprawianie jakości danych pomiarowych (usuwanie trendów w zapisach, usuwanie wartości średnich itp.), analiza widmowa zarejestrowanych zapisów, analiza polaryzacyjna i obliczanie korelogramów,
- przetwarzanie właściwe - wyznaczanie funkcji Greena dla fali powierzchniowej, budowanie modeli krzywych dyspersji dla prawdopodobnych rozkładów prędkości w ośrodku geologicznym,
- interpretacja - rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego w określaniu rozkładów parametrów geofizycznych w badanym ośrodku geologicznym,
- edycja wyników - graficzne przedstawianie wyników obliczeń.

3.5. Testy systemu

Testowano model systemu LOFRES za pomocą 3 autonomicznych trójskładowych czujników CMG-6TD z wyjściem cyfrowym oraz zmodyfikowanego do rejestracji ciągłej systemu ARAMIS M/E, do którego podłączono 3 trójskładowe czujniki CMG-6T z wyjściem analogowym. Schemat blokowy modelowej wersji systemu LOFRES przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Przykład schematu pomiarowego systemu LOFRES
 Fig. 5. Example of the measuring scheme of LOFRES system



Rys. 6. Schemat blokowy modelowej wersji systemu LOFRES wyposażonego w 3 trójskładowe czujniki CMG-6T i 3 trójskładowe czujniki CMG-6TD

Fig. 6. Block diagram of the model version of LOFRES system equipped with 3 three-component sensors CMG-6T and 3 three-component sensors CMG-6TD

Do akwizycji danych w modelu wykorzystano: 3 czujniki CMG-6TD z zapisem w lokalnej pamięci Flash (16 Gb) oraz system sejsmiczny ARAMIS M/E, do którego nadajników NSGA podłączono 3 czujniki CMG-6T. Rejestrowane dane w systemie ARAMIS M/E zapisywane były w pamięci mobilnego serwera (laptopa). Czujniki firmy Guralp wymagały zasilania akumulatorowego AKU, zaś system ARAMIS M/E zasilania z przetwornicy DC/AC i akumulatora.

Testy modelu systemu na poligonie potwierdziły możliwość prowadzenia rejestracji w sposób przewodowy, radiowy i zapisu bezpośredniego. Synchronizację rejestracji uzyskano za pomocą odbiorników GPS.

4. Podsumowanie

System LOFRES jest przeznaczony do badania budowy i właściwości przypowierzchniowych warstw ośrodka geologicznego dwoma metodami sejsmiki pasywnej: sondowaniem mikrosejsmicznym i interferometrią sejsmiczną na podstawie rejestracji szumu sejsmicznego. System ten umożliwia w sposób automatyczny prowadzenie ciągłych pomiarów drgań w warunkach terenowych z odpowiednią dynamiką w zakresie niskich częstotliwości. W zależności od celu badań system pozwala na wykonywanie pomiarów w różnych konfiguracjach. System LOFRES składa się z części aparaturowej i programowej służącej do przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych. Jest on złożony z odpowiednio skonfigurowanych modułów pomiarowych i współpracującego z nimi centrum przetwarzania, interpretacji i zobrazowania wyników. System ten posiada mobilne autonomiczne stacje pomiarowe wyposażone w jedno lub trójskładowe niskoczęstotliwościowe czujniki i stacjonarne stacje referencyjne wyposażone w trójskładowe niskoczęstotliwościowe czujniki. Stacje pomiarowe i referencyjne są wyposażone w zasilanie akumulatorowe oraz odbiornik GPS do precyzyjnej synchronizacji podstawy czasu i określania położenia czujników podczas dokonywania pomiarów.

Wstępne testy wykazały przydatność opracowanego i wykonanego modelu systemu LOFRES do realizacji badań poligonowych. Dotychczasowe rezultaty badań systemem

LOFRES są zachęcające, szczególnie w zakresie metody interferometrii sejsmicznej, która okazała się skuteczna [8] i może być wykorzystywana w sejsmologii do rozpoznawania budowy geologicznej głębokiego podłoża i w sejsmice poszukiwawczej do odtwarzania struktur geologicznych. Istnieje również możliwość wykorzystania tej metody do potrzeb górniczych.

Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr PBS1/A2/13/2013 o akronimie LOFRES uzyskanego w ramach I konkursu Programu Badań Stosowanych dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

1. Czarny R.: Przegląd zastosowania metody interferometrii sejsmicznej. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w tym zeszytcie).
2. Dębski W.: Tomografia sejsmiczna w górnictwie. „Przegląd Górniczy” 2012, nr 7, (w tym zeszytcie).
3. Isakow Z.: Safecomine intrinsically safe system for monitoring of hazards in mines related to disturbance of the strata and environment equilibrium. Controlling Seismic Hazard and Sustainable Development of Deep Mines (Chun'an Tang ed.), Rinton Press, New York/New Jersey, (2009), s.1045 – 1056.
4. Lurka A.: Wybrane teoretyczne i praktyczne zagadnienia tomografii pasywnej w górnictwie podziemnym. Prace naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, 2009, Nr 879.
5. Isakow Z.: Systemy i urządzenia do monitorowania zagrożeń sejsmicznych w kopalniach i otaczającym środowisku, w: Innowacje dla gospodarki, Wyd. Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice 2010, s. 162-187.
6. <http://www.guralp.com/>.
7. Marcak H., Pilecki Z., Isakow Z., Czarny R.: Możliwości wykorzystania metody interferometrii sejsmicznej w górnictwie. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w tym zeszytcie).
8. Pilecki Z., Isakow Z., Projekt LOFRES – sejsmika pasywna LFS z wykorzystaniem szumu sejsmicznego. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w tym zeszytcie).
9. Sikora M., Mazik P.: W kierunku większych możliwości oceny zagrożenia sejsmicznego – systemy Hestia i Hestia Mapa. „Mechanizacja i Automatyza Górnictwa” 2009, nr 3.