Marcin ZYCH[1], Przemysław WŁODARCZYK[2], Marcin NOWAK[3], Tomasz KUBACKA[3], Andrzej GARDEŁA[4]

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska (1), AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji (2), Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych "CHEMKOP" Sp. z o.o., Zakład Geofizyki Górniczej (3), Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych "CHEMKOP" Sp. z o.o., Zakład Technologii Chemicznych i Ochrony Środowiska (4)

doi:10.15199/48.2018.08.33

System do pomiarów geofizycznych w wysadach solnych

Streszczenie. *Pomiary geofizyczne w otworach wiertniczych niosą szereg wyzwań pod kątem konstrukcji przyrządów pomiarowych, ich kontroli oraz akwizycji danych. W artykule przedstawiono proces konstrukcyjno – badawczy, związany z powstaniem systemu do pomiarów geofizycznych w wysadach solnych. Zbudowany system pomiarowy składa się z: sondy gamma do pomiaru naturalnej promieniotwórczości, inklinometru do pomiarów usytuowania otworu, kawernomierza wielkośrednicowego do badań kształtu otworu wiertniczego oraz naziemnego układu kontroli i akwizycji danych.*

Abstract*. Geophysical measurements in boreholes carry a number of challenges in terms of the construction of gauges, their control and data acquisition. The article presents a construction-research process related to the creation of a system for well-logging in salt deposits. The built-in measurement system consists of: a gamma probe for measuring natural radioactivity, an inclinometer to measure the location of the borehole, a large-scale caliper log for testing the shape of a borehole and a ground-based control and data acquisition system. (****System for geophysical measurements in salt dome****).*

Słowa kluczowe: sonda gamma, inklinometr, kawernomierz wielkośrednicowy, pomiary geofizyczne.
Keywords: gamma probe, inclinometer, large-scale cali-per log, well-logging.

Wstęp

Budowa zbiorników na gaz ziemny w wysadach solnych jest jednym ze strategicznych celów zapewnienia Polsce niezależności energetycznej.

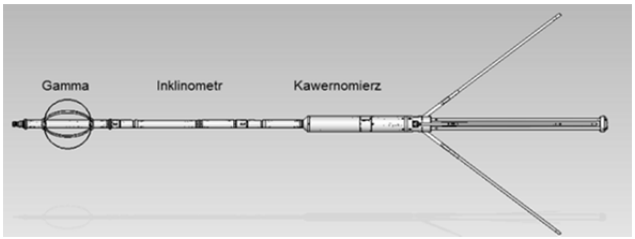
Wykonanie takiego zbiornika rozpoczyna się od wykonania odwiertu, który może mieć głębokość nawet do 2 km. Duża głębokość oraz niejednorodność wysadów solnych i innych formacji geologicznych, a także jakość wykonanego zbiornika wymuszają wykonywanie podstawowych pomiarów geofizycznych. Istotnym przy tym jest pomiar takich wielkości jak: zmiana temperatury wraz z głębokością, zmiany średnicy otworu, w tym pomiar średnicy powstałych kawern, kąta nachylenia otworu oraz zmian natężenia naturalnego promieniowania gamma, głównie pod kątem korelacji głębokościowej.

Wykonanie prototypowego zestawu sond geofizycznych, który wiązał się z interdyscyplinarnymi badaniami, podjął się Zakład Geofizyki Górniczej, Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Górnictwa Surowców Chemicznych "CHEMKOP" Sp. z o.o., we współpracy z Zakładem Elektrochemii Stosowanej Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej oraz Katedrą Geofizyki Wydziału Geologii, Geofizyki Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

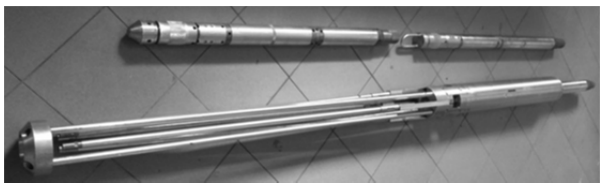
Prototyp zestawu sond geofizycznych wraz z układem akwizycji danych został wykonany w ramach zadania nr 1 projektu, pt.: „Opracowanie technologii wraz z urządzeniami do pomiarów otworów wiertniczych" współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Regionalnego (umowa o dofinansowanie nr POIG 01.04.00-12-030/13 z dnia 30.05.2014 r. zawarta pomiędzy Narodowym Centrum Badań i Rozwoju a OBR Górnictwa Surowców Chemicznych CHEMKOP Sp. z o.o.).

Warunki, które panują wewnątrz otworu wiertniczego stanowiły duże wyzwanie dla zespołu konstrukcyjnego. Stąd założenia projektowe obejmowały: wytrzymałość na ciśnienie 24 MPa, praca do temperatury maksymalnej 60°C w agresywnym środowisku, aktywnym chemicznie o dużym zasoleniu. Dodatkową trudnością było zmieszczenie urządzeń elektronicznych w obudowie o średnicy wewnętrznej 60 mm, sterowanie, przesył i akwizycja danych oraz zasilanie układu pomiarowego sondy gamma wysokim napięciem (do 1500V).

W ramach projektu skonstruowano system, który składa się z: sondy do pomiaru naturalnego promieniowania gamma w jednostkach API, inklinometru, kawernomierza wielkośrednicowego (o maksymalnej średnicy pomiaru 2000 mm) oraz naziemnego układu do sterowania i akwizycji danych (rys. 1 i rys. 2). Założono, że poszczególne części układu pomiarowego powinny działać zarówno samodzielnie, jak i w zestawie oraz mieć możliwość dalszego rozwoju konstrukcyjnego.



Rys. 1. Schemat części otworowej zestawu do pomiarów geofizycznych



Rys. 2. Zdjęcie zestawu do pomiarów geofizycznych

Istotną częścią projektu był odpowiedni dobór materiałów konstrukcyjnych i ich połączeń, tak aby zminimalizować możliwość powstawania ognisk korozyjnych, którym zajmował się zespół z Zakładu Elektrochemii Politechniki Śląskiej, w składzie: dr inż. Ginter Nawrat oraz mgr inż. Tomasz Wieczorek [1].

Sonda gamma

Sonda gamma służy do pomiaru naturalnej całkowitej promieniotwórczości promieniowania gamma (GR) pochodzącej z formacji skalnych (rys. 3 i 4) [2,3]. Budowany układ działa w formie licznika, czyli podaje zliczenia w zadanym czasie próbkowania, które są przeliczane na jednostki API (American Petroleum Institute). Wymaga to wcześniejszej kalibracji układu oraz sprawdzenia przed pomiarami punktu referencyjnego przy pomocy kocyka torowego (rys. 5).

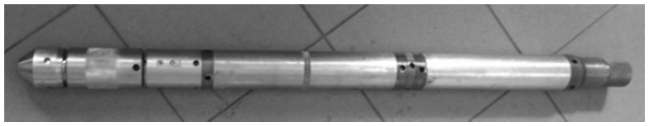
Zewnętrzny wygląd sondy gamma jest przedstawiony na zdjęciu – rys. 3 oraz na schemacie – rys. 4.

Konstrukcję części elektronicznej oparto na sprawdzonych i niezawodnych elementach oraz schematach, które pozwalają na pomiary w tak specyficznym środowisku, jak otwór wiertniczy.

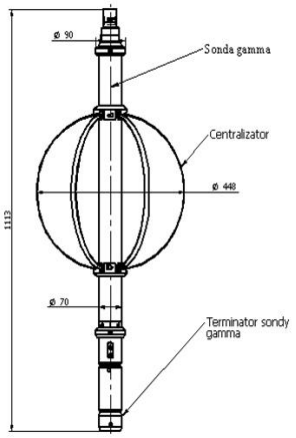
Sonda gamma składa się z czterech podstawowych elementów, co zostało zobrazowane na schemacie blokowym na rys. 6.

Zasadniczym jej elementem jest kryształ scyntylacyjny NaI(Tl), który wraz z fotopowielaczem (PMT) stanowi tzw. scyntyblok. Wybór kryształu NaI(Tl) wiązał się z tym, że w tego typu pomiarach niezbędne jest zapewnienie odpowiedniej wydajności detekcji promieniowania w zakresie energii 40 keV ÷ 3 MeV, niskiego tła własnego, stabilności detekcji w zakładanych temperaturach pracy oraz korzystnego stosunku ceny do jakości.

Biorąc pod uwagę dostępną przestrzeń wewnątrz obudowy oraz to, że scyntyblok musi się znaleźć w dodatkowej obudowie przeciwwstrząsowej, obliczono średnicę kryształu na 30 mm i jego minimalną długość na 120 mm [4,5]. Ten istotny element został wykonany na zamówienie przez czeską firmę Envinet a.s.



Rys. 3. Fotografia gotowej sondy gamma



Rys. 4. Schemat zewnętrznej budowy sondy gamma wraz z podstawowymi wymiarami, podanymi w mm

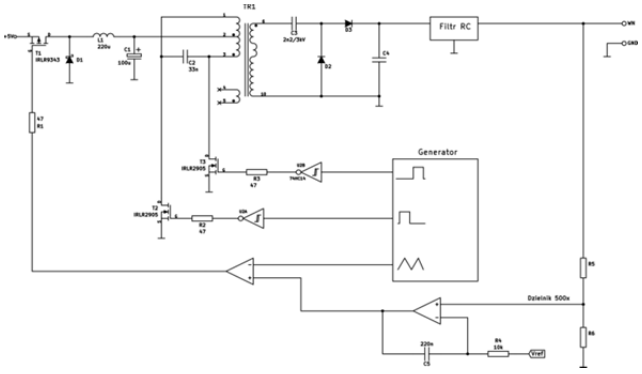
Rys. 5. Kocyk torowy służący do pomiaru punktu referencyjnego, przeliczania zliczeń na jednostki API dla sondy gamma

Kolejnym istotnym elementem był zasilacz wysokiego napięcia, którego stabilność i niski poziom zakłóceń są kluczowe dla poprawnej kalibracji i pracy sondy oraz braku zliczania fałszywych impulsów [4,6]. Po rozważeniu kilku możliwych rozwiązań, zdecydowano się na układ wzorowany na układzie Royera (rys. 7). Ostatecznie w wyniku przeprowadzonych testów dobrano tak parametry elementów układu, które pozwalają na wytłumienie zakłóceń szpilkowych oraz szumów niskiej częstotliwości do poziomu poniżej 5 mVpp, przy napięciu wyjściowym 1,5 kV i obciążeniu prądem 0,75 mA. Sprawność całego układu osiągnęła ok. 70%, co jest bardzo dobrym wynikiem, biorąc pod uwagę niski poziom zakłóceń.

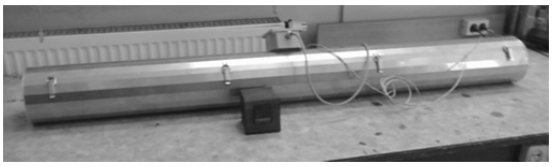
Rys. 6. Schemat blokowy budowy sondy gamma

W przypadku konstrukcji układu regeneracji i kształtowania impulsów pochodzących z fotopowielaczy przyjęto klasyczne rozwiązanie w oparciu o wzmacniacz operacyjny oraz komparator, które jako sprawdzone, odznaczają się dużą wydajnością (krótkie czasy martwe) oraz stabilnością działania. Próg komparacji dobrano tak, aby szumy nie mogły wyzwalać fałszywych zliczeń.

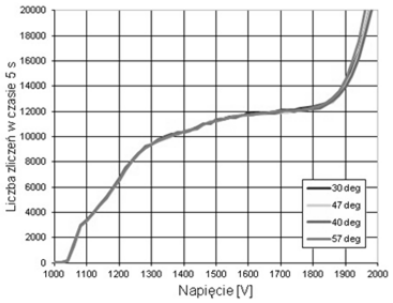
Jako licznik impulsów zastosowano mikrokontroler [7]. Rozwiązanie to jest korzystne ze względu na niski koszt oraz małe rozmiary układu. Ponadto umożliwia realizację bardziej rozbudowanych funkcji niż proste zliczanie impulsów, co pozwala w przyszłości na rozbudowę układu pomiarowego o kolejne funkcje pomiarowe.



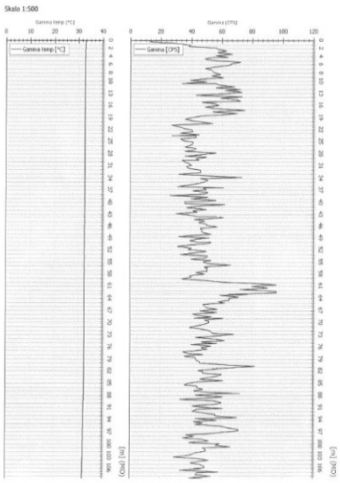
Rys. 7. Schemat blokowy zasilacza wysokiego napięcia zastosowany w sondzie gamma



Rys. 8. Stanowisko pomiarowe do testowania stabilności temperaturowej m.in. sondy gamma



Rys. 9. Przykładowe wyniki pomiaru zależności liczby zliczeń od napięcia polaryzacji dla wybranych zmian temperatury pracy scyntybloku



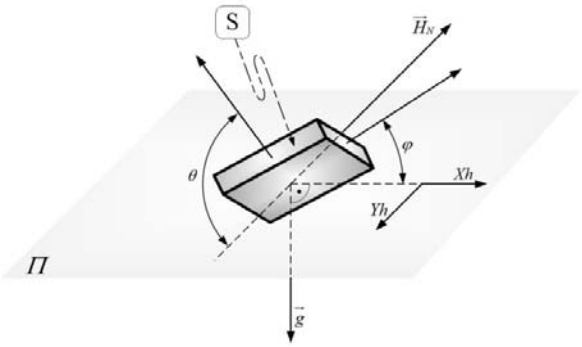
Rys. 10. Przykładowy diagram krzywej GR oraz temperatury z pomiaru w otworze wiertniczym

Testy układu pomiarowego sondy gamma obejmowały zarówno wydajność dla źródeł promieniowania gamma o różnych energiach, jak i stabilność temperaturową.

W tym celu zbudowano stanowisko wyposażone w układ grzewczy przedstawiony na rys. 8. Przykładowe wyniki testowe przy zmianach temperatury pracy scyntybloku znajdują się na rys. 9, natomiast na rys. 10 przykładowy diagram z pomiaru w otworze wiertniczym.

Inklinometr

Pomiary inklinometrem pochylenia otworu wiertniczego są standardowymi pomiarami określającymi stan techniczny otworu. Skrzywienie otworu wiertniczego powstające w trakcie wiercenia ma ogromne znaczenie ze względu na trafienie otworem wiertniczym w daną formację geologiczną. Szczególne znaczenie ma to przy wierceniu otworów kierunkowych. Dlatego tak ważną rolę odgrywa dokładny pomiar kąta pochylenia otworu oraz odniesienie go względem północy magnetycznej [2].



Rys. 11. Idea pomiaru kątów: φ - nachylenia, θ - przechyłu, służących do określenia azymutalnego usytuowania otworu wiertniczego [8]

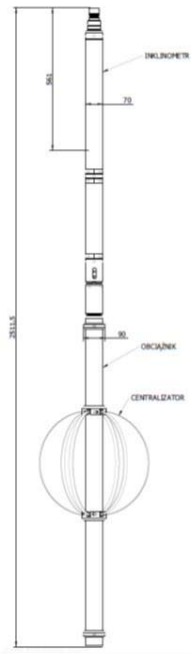
Aby określić położenie dna otworu wiertniczego o głębokości 1000 m z dokładnością do 9 m, przyrząd pomiarowy musi określać skrzywienie otworu z dokładnością lepszą niż 0,5°. Wymagania odnośnie określenia północy magnetycznej są znacznie mniejsze, gdyż odległość pozioma, o jaką może być przesunięte dno otworu, jest niewielka w porównaniu z jego głębokością. Dlatego też wystarczające jest określenie północy magnetycznej z dokładnością rzędu 2,5°. Rys. 11 pokazuje ideę pomiaru kątów: φ - nachylenia, θ - przechyłu oraz usytuowania czujnika (S) względem osi magnetycznych Xh i Yh oraz magnetycznego bieguna północnego $\vec{H}_N$ leżących na lokalnej płaszczyźnie pomiarowej Π. $\vec{g}$ oznacza lokalne przyspieszenie grawitacyjne [8].

Celem zbudowania inklinometru przetestowano następujące czujniki dostępne na rynku: VN-100 (VectorNav Technologies), OS3DM – subminiature 3D Orientation Sensor (Inertial Labs), GY-80 Arduino (Smart Projects), LSM303DLHC (STMicroelectronics), MPU-9150 (InvenSense Inc.) na stanowisku pomiarowym, przedstawionym na rys. 12.

Przy czym przy wyborze najlepszego rozwiązania kierowano się następującymi kryteriami:

- dokładność odczytu składowych przyspieszenia w trzech osiach x, y, z,
- dokładność odczytu składowych pola magnetycznego w trzech osiach x, y, z,
- małe wymiary umożliwiające umieszczenie czujnika w sondzie,
- wbudowane algorytmy do obliczania potrzebnych kątów,
- wewnętrzna kalibracja czujnika oraz kompensacja umieszczonych w otoczeniu elementów magnetycznych,
- zakres temperatury pracy.

Rys. 12. Stanowisko do testowania magnetometrów

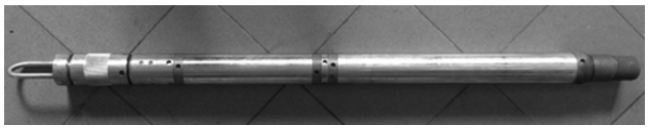


Rys. 13. Schemat zewnętrznej budowy modułu pomiarowego z inklinometrem

Ostatecznie wybrano czujnik VN-100, który pozwala na komunikację za pomocą interfejsu RS-232 z rozsądną prędkością transmisji. W efekcie zbudowano inklinometr,

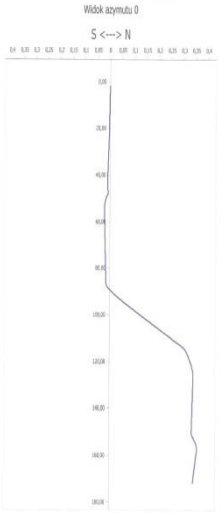
którego schemat budowy zewnętrznej pokazuje rys. 13 oraz zdjęcie na rys. 14.

Zbudowany inklinometr przy próbkowaniu z częstotliwością 2 Hz oraz prędkości przesuwu sondy na poziomie 6 m/min, charakteryzuje się pionową rozdzielczość pomiarową wynoszącą 5 cm. Zmniejszenie prędkości pomiarowej lub/i zwiększenie częstotliwości próbkowania umożliwia zwiększenie pionowej rozdzielczości pomiarowej.



Rys. 14. Zdjęcie inklinometru

Pomiar inklinometrem przeprowadzany jest w sposób ciągły od dołu do góry. Wyniki profilowań przedstawiane są na rys. 15 w formie wykresów kąta odchylenia osi otworu w funkcji głębokości w kartezjańskim układzie współrzędnych.



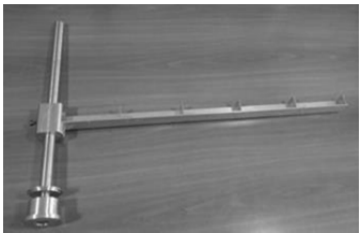
Rys. 15. Przykładowy diagram profilowań azymutu otworu wiertniczego

Rys. 16. Kalibrator inklinometru

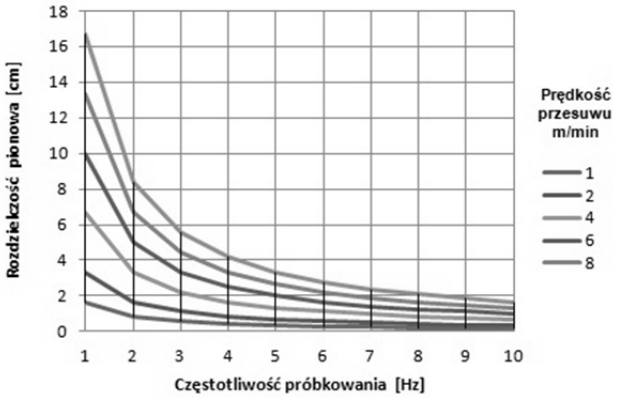
Podobnie jak inne moduły zestawu do pomiarów otworowych, również inklinometr wymaga wcześniejszej kalibracji oraz kontroli punktów referencyjnych. Stąd dla potrzeb kalibracji sondy stworzono specjalne narzędzie nazywane kalibratorem inklinometru (rys. 16). Pozwala on na obrót sondy wokół trzech osi (x, y, z) w pełnym zakresie wymaganych kątów, umożliwiając tym samym prawidłową kalibrację urządzenia.

Kawernomierz wielkośrednicowy

Otworowy kawernomierz jest narzędziem wgłębnym służącym do pomiaru średnicy otworu wiertniczego [2]. Urządzenie pozwala na pomiar odległości czterema niezależnymi ramionami, z których każde ma zakres pomiarowy do 1 m, co jest nietypowym rozwiązaniem. Symetryczne usytuowanie ramion pomiarowych pozwala na pomiar średnicy otworu do 2 m. Środowisko pomiarowe w potencjalnych otworach wiertniczych wymusiło badania pod kątem wytrzymałościowym ramion kawernomierza oraz odporności na ścieranie elementów stykających się bezpośrednio ze ściankami otworu. Także niezbędne było skonstruowanie elementów sterujących oraz komunikacji z naziemnym modułem akwizycji danych. Dodatkowo skonstruowano sprawdzian do kalibracji, zwany kalibratorem kawernomierza (rys. 17). Kalibracja przed pomiarami jest niezbędna, ze względu na stopniowe zużywanie się wymiennych końcówek ramion kawernomierza.



Rys. 17. Kalibrator kawernomierza



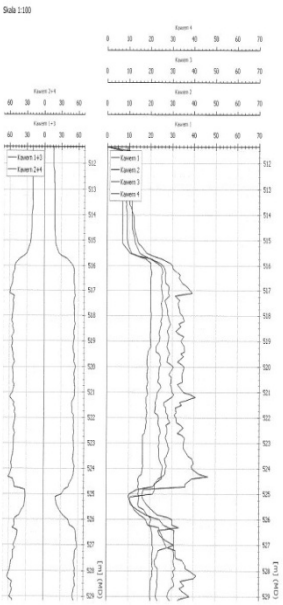
Rys. 18. Zależność rozdzielczości pionowej kawernomierza wielkośrednicowego od częstotliwości próbkowania, przy wybranych prędkościach przesuwu

Otrzymany prototyp sondy pomiarowej waży 116 kg. Przy czym pomiar kawernomierzem z prędkością 6m/min, przy jednoczesnym próbkowaniu na poziomie 2 Hz, pozwala na uzyskanie pionowej rozdzielczości pomiarowej wynoszącej 5 cm. Zależność między częstotliwością próbkowania, a rozdzielczością i prędkością przesuwu sondy przedstawia wykres na rys. 18.

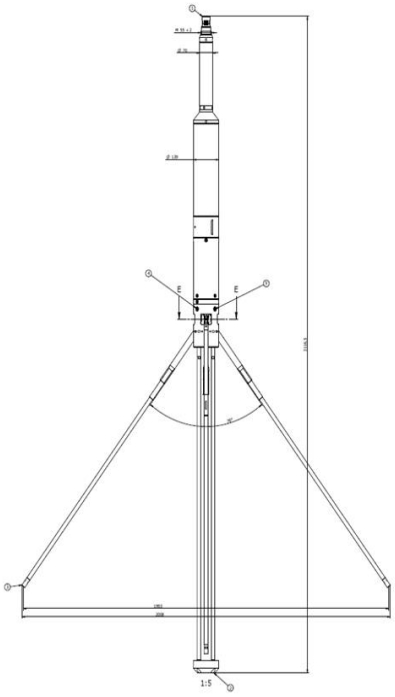
Zmniejszenie prędkości pomiarowej i/lub zwiększenie częstotliwości próbkowania pozwala na zwiększenie pionowej rozdzielczości pomiarowej.

Podobnie jak w przypadku pozostałych modułów zestawu pomiarowego, pomiar kawernomierzem jest pomiarem ciągłym, co pokazuje diagram na rys. 19.

Efektem prowadzonych badań i rozważań konstrukcyjnych jest sonda, której schemat budowy zewnętrznej pokazany jest na rys. 20, a zdjęcie na rys. 21.



Rys. 19. Przykładowy diagram profilowań średnicy otworu kawernomierzem wielkośrednicowym



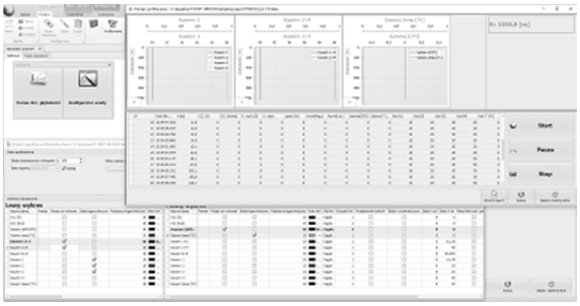
Rys. 20. Schemat zewnętrznej budowy kawernomierza

Rys. 21. Zdjęcie kawernomierza wielkośrednicowego ze złożonymi ramionami

Transmisja i akwizycja danych

Niezbędnym elementem zestawu jest układ naziemny do kontroli sond i akwizycji danych, który składa się z pulpitu sterującego (rys. 22) oraz komputera PC z oprogramowaniem dedykowanym do obsługi wykonanego układu pomiarowego (rys. 23). Cały system umożliwia przesył sygnałów cyfrowych, które są bardziej odporne na zakłócenia przy przesyle, niż sygnały analogowe.

Rys. 22. Pulpit sterujący układem pomiarowym



Rys. 23. Interfejs (GUI) oprogramowania służącego do kontroli układu pomiarowego oraz akwizycji danych

Oprogramowanie umożliwia:

- konfigurowanie zestawu sond i definiowanie podzespołów,
- przeprowadzenie symulacji pomiaru dla potrzeb sprawdzenia poprawności działania zestawu,
- rejestrację, akwizycję oraz edycję danych pomiarowych,
- wizualizację danych w formie tabelarycznej i graficznej,
- drukowanie raportu finalnego.

Do połączenia zestawu otworowego z naziemnym układem kontroli i akwizycji danych służy kabel karotażowy firmy Pscovgeocable, który był dobrany ze względu na możliwość przesyłania danych z wymaganą prędkością (9600 b/s) oraz odpowiednią wytrzymałość, gdyż cały zestaw pomiarowy waży 201 kg.

Wytrzymałość kabla karotażowego, zniekształcenia sygnału oraz szybkość przesyłu danych były także tematem badań, prowadzonych przy projektowaniu zestawu.

Podsumowanie

Zaprojektowany system do pomiarów geofizycznych był dużym wyzwaniem dla zespołu projektowego, ze względu na warunki pracy układu pomiarowego w otworze wiertniczym, przy spełnieniu założeń projektowych. Zrealizowany projekt był projektem interdyscyplinarnym, który połączył współpracą firmę OBR „CHEMKOP" Sp. z o.o. z ośrodkami akademickimi.

Pierwsze pomiary testowe wykazały, że projekt zakończył się sukcesem. Mimo to są prowadzone dalsze badania nad jego rozwojem, gdyż zbudowany zestaw wykazuje pod tym względem duży potencjał.

Dla przykładu sondę gamma można przebudować tak, by mogła służyć do pomiarów spektrometrycznych, celem wyznaczania zawartości naturalnych pierwiastków i rodzin promieniotwórczych, czy też gęstości i wskaźnika elektronowego P_e formacji skalnych. Wówczas sonda będzie dociskana do ścianki otworu i może być do niej dołączone zamknięte źródło promieniotwórcze.

Dalsze badania są również prowadzone w kierunku zmniejszenia masy zestawu, zwłaszcza kawernomierza, przy równoczesnym zapewnieniu odpowiedniej wytrzymałości oraz doskonalenia metod kalibracji.

Projekt został dofinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Regionalnego (umowa o dofinansowanie nr POIG 01.04.00-12-030/13 z dnia 30.05.2014 r. zawarta pomiędzy Narodowym Centrum Badań i Rozwoju a OBR Górnictwa Surowców Chemicznych CHEMKOP Sp. z o.o.)

***Autorzy**: dr inż. Marcin Zych, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków. E-mail: zych@geol.agh.edu.pl.; dr inż. Przemysław Włodarczyk, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków. E-mail: przemyslaw.wlodarczyk@agh.edu.pl.; mgr inż. Marcin Nowak, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych "CHEMKOP" Sp. z o.o., Zakład Geofizyki Górniczej, ul. J. Wybickiego 7, 31-261 Kraków. E-mail: marcin.nowak@ichemkop.pl.; mgr inż. Tomasz Kubacka, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych "CHEMKOP" Sp. z o.o., Zakład Geofizyki Górniczej, ul. J. Wybickiego 7, 31-261 Kraków. E-mail: tomasz.kubacka@ichemkop.pl.; dr inż. Andrzej Gardeła, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych "CHEMKOP" Sp. z o.o., Zakład Technologii Chemicznych i Ochrony Środowiska, ul. J. Wybickiego 7, 31-261 Kraków. E-mail: andrzej.gardela@ichemkop.pl.;*

LITERATURA

[1] Nawrat G., et al. Microplasma Oxidation of Magnesium Alloy AZ91D by Impulse Current, *Solid State Phenom,* 227 (2015); 151–154

[2] Jarzyna J., Wawrzyniak-Guz K. (red.), *Adaptacja do warunków polskich metodologii wyznaczania sweet spot'ów na podstawie korelacji pomiarów geofizycznych z rdzeniami wiertniczymi. Zadanie 10 w Projekcie MWSSSG: Metodologia wyznaczania sweet spot'ów na podstawie własności geochemicznych, petrofizycznych, geomechanicznych w oparciu o korelację wyników badań laboratoryjnych z pomiarami geofizycznymi i model generacyjny 3D*, Drukarnia GOLDRUK Wojciech Golachowski, Kraków 2017

[3] Zych M., Pomiar zawartości toru, uranu i potasu w próbkach z rdzeni wiertniczych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 9, 142-145

[4] Knoll G.F., *Radiation detection and measurement*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000

[5] Radke R.J., et al.: A new capture and inelastic spectroscopy tool takes geochemical logging to the next level, *SPWLA 53rd Annual Logging Symposium, June 2012*, (2012), 103

[6] Pałka K., Zorski T., Zestaw sond radiometrycznych do badania płytkich otworów wiertniczych, *Geologia* 20 (1994), z. 2, 169-181

[7] Witkowski J., Jaśnikowski M., Układ spektrometru izotopowego do zastosowań w miernictwie przemysłowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 7, 55-59

[8] Caruso M.J., Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems, *Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000*, (2000), 177-184