

Koncepcja wykorzystania czujników przyspieszenia z akustyczną falą powierzchniową w telemetrii błotnej

Streszczenie. W pracy przedstawiono koncepcję wykorzystania czujnika przyspieszenia z akustyczną falą powierzchniową w impulsowej telemetrii błotnej. Pokazano realizację odwiertów w formacjach łupkowych. Omówiono metody transmisji sygnałów pomiędzy dolnym zespołem wiertniczym, a zespołem sterowania wykonywaniem odwiertu. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych potwierdzających przyjętą koncepcję.

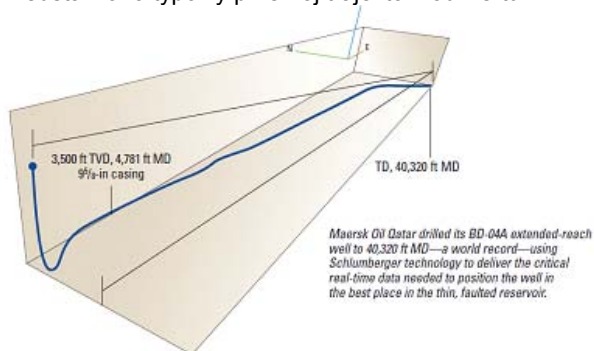
Abstract. The paper presents a concept of using acceleration sensor surface acoustic wave in a mud pulse telemetry. Showing the realization of drilling in shale formations. Showing a method of transmitting signals between the lower drilling unit, and the control unit performing well. We present the results of experimental studies confirming adopted the concept. *(The Concept of Using Acceleration Sensors Surface Acoustic Wave in the Telemetry Mud)*

Słowa kluczowe: impulsowa telemetria błotna, akustyczne fale powierzchniowe, czujnik przyspieszenia

Keywords: Mud Pulse Telemetry, surface acoustic waves, acceleration sensor

Wstęp

Poszukiwania gazu i ropy w formacjach łupkowych wymagają wykonania wielu odwiertów. Odwierty wykonywane są na bardzo duże odległości sięgające łącznie nawet do kilkunastu kilometrów. Na rys. 1 przedstawiono typowy przekrój trajektorii odwiertu.



Rys 1. Trójwymiarowy przekrój trajektorii wierceń [1]

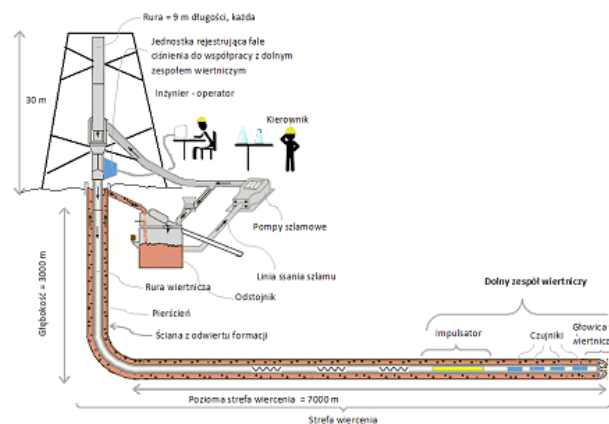
Każdy odwiert posiada strefę pionową o głębokości około 3km, oraz strefę wiercenia poziomego o długości dochodzącej do 7km. Średnica odwiertu zwykle wynosi około 15cm. Do odwiertów jest wprowadzona stalowa rura płuczkowa złożona z odcinków o długości 9m i średnicy od 50mm do 125mm. Pompy szlamowe (wyporowe) tłoczą wodę płuczkową do wnętrza rur stalowych pod ciśnieniem 300Bar, co zapewnia energię niezbędną do realizacji procesu wiercenia. Na rys. 2 przedstawiono schemat wykonania typowego odwiertu. Możemy w nim wyróżnić:

1. centralne stanowisko pomiarowo-sterownicze umieszczone na powierzchni ziemi.
2. dolny zespół wiertniczy.
3. Stalowe rury płuczkowe łączące centralne stanowisko sterownicze z dolnym zespołem wiertniczym.

Centralne stanowisko pomiarowo-sterownicze zapewnia realizację procesu wiercenia. Jest ono złożone z układów automatyki sterowniczej oraz komputerów odpowiedzialnych za realizację poleceń, wizualizację parametrów procesu technologicznego oraz rejestrację potrzebnych danych. Dla zapewnienia prostopadłego wprowadzenia i utrzymania rury w pionowej pozycji na powierzchni znajduje się także wieża wiertnicza. Jej wysokość zwykle nie przekracza 30 metrów.

W bliskiej odległości od wieży jest umieszczony zestaw pomp szlamowych zasilanych elektrycznie oraz odstojnik

spełniający funkcję filtra. Jest on połączony z pompami za pomocą tzw. linii ssania wody płuczkowej, czyli przewodów, którymi szlam wydobyty na powierzchnię po jego odstaniu, jest ponownie wprowadzany jako medium do zasilania pomp. Odpowiednio dawkowana woda płuczkowa jest doprowadzana do dolnego zespołu wiertniczego pod wysokim ciśnieniem poprzez sieć stalowych rur.

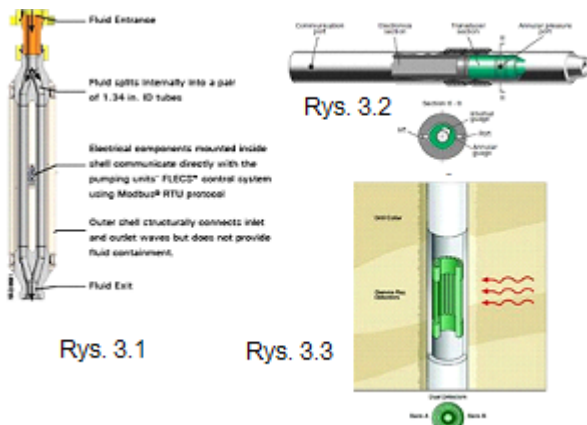


Rys. 2. Schemat odwiertu wykonywanego przy poszukiwaniu gazu i ropy w formacjach łupkowych [1]

Dolny zespół wiertniczy jest złożony z:

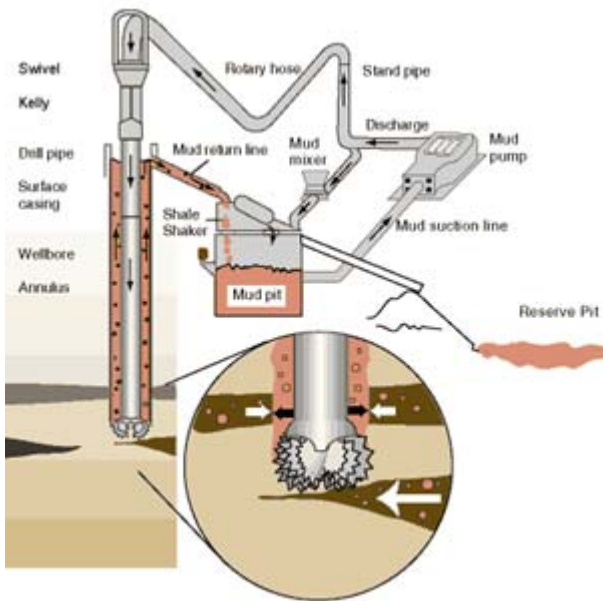
1. głowicy wiertniczej i układu sterowania jej ruchem,
2. układu czujników:
 - temperatury i różnicy ciśnienia (rys. 3.1),
 - systemu pomiarowego parametrów wiercenia, który zbiera dane z trzech akcelerometrów (w celu określenia stopnia nachylenia wiertła od płaszczyzny pionowej), trzech magnetometrów (w celu określenia kierunku w odniesieniu do pola magnetycznego Ziemi), prędkości obrotowej głowicy wiertniczej, wstrząsów i drgań rurociągu, siły nacisku na wiertło, momentu obrotowego, porowatości i rezystywności formacji. (rys. 3.2),
 - zestawu detektorów promieniowania gamma dla określenia rodzaju i porowatości skał formacji oraz sprawdzenia obecności izotopów uranu, toru i potasu (rys. 3.3),
3. impulsatora.

Zestaw czujników w dolnym zespole wiertniczym przedstawiono na rys. 3 [2]. Znajomość dużej ilości mierzonych wielkości fizycznych jest konieczna dla zapewnienia sprawnego procesu wiercenia.



Rys. 3. Zestaw czujników w dolnym zespole wierniczym [2]

Obrotowa końcówka głowicy wierniczej jest odpowiedzialna za torowanie drogi odwiertu, a także za przepuszczanie wody płuczkowej poprzez znajdujące się w niej szczeliny. Woda płuczkowa wraca na powierzchnię z zanieczyszczeniami w postaci szlamu błotnego. Szlam jest złożony z wody płuczkowej oraz cząstek stałych w postaci różnego rodzaju grudek ziemnych i skruszonych fragmentów skalnych. Na powierzchni szlam jest oczyszczany, a woda płuczkowa zostaje ponownie wykorzystana (rys.4) [2].



Rys. 4. Obieg wody płuczkowej podczas procesu wierniczenia [2]

Dla zapewnienia poprawnej pracy układu wierniczego konieczna jest kontrola kierunku wierniczenia oraz utrzymanie na odpowiednim poziomie ciśnienia panującego w głowicy wierniczej. Jeżeli ciśnienie w końcowej partii głowicy będzie zbyt niskie, to nie pokona ono oporu formacji skalnej. W konsekwencji tego formacja ta przeniknie do błota szlamowego. W przypadku stosowania impulsowej telemetrii błotnej (opisanej w następnym punkcie) efekt ten może spowodować znaczne zakłócenie wykonywanych pomiarów poprzez zaburzenie szlamowego sygnału informacyjnego. Utrzymanie odpowiednio wysokiego ciśnienia roboczego w układzie wierniczym i na bieżąco kontrola parametrów stanu płuczki wierniczej jest sprawą bardzo istotną. Już ten przykład pokazuje, że sterowanie procesem wierniczenia wymaga dwustronnej komunikacji pomiędzy dolnym zespołem wierniczym, a znajdującym się

na powierzchni ośrodkiem kontroli procesu wierniczenia. Uzyskane w dolnym zespole wierniczym dane pomiarowe muszą zostać przekazywane do centralnego stanowiska sterowniczego na powierzchnię, a wypracowane na ich podstawie procedury sterują pracą dolnego zespołu wierniczego. Duża odległość (przekraczająca 10km) pomiędzy ośrodkami kontroli procesu wierniczenia, a dolnym zespołem wierniczym oraz trudne warunki występujące w procesie wierniczenia wymagają rozwiązania wielu problemów techniczno-technologicznych aby zapewnić wystarczająco szybką transmisję danych pomiędzy tymi ośrodkami. Dla rozwiązania tego problemu można wykorzystać różne sposoby transmisji sygnałów. Podstawowe z nich to:

1. Metoda wykorzystująca przewody elektryczne.
2. Metoda akustyczna,
3. Metoda wykorzystująca fale elektromagnetyczne,
4. Inteligentne rury płuczkowe,
5. Metoda impulsowej telemetrii błotnej.

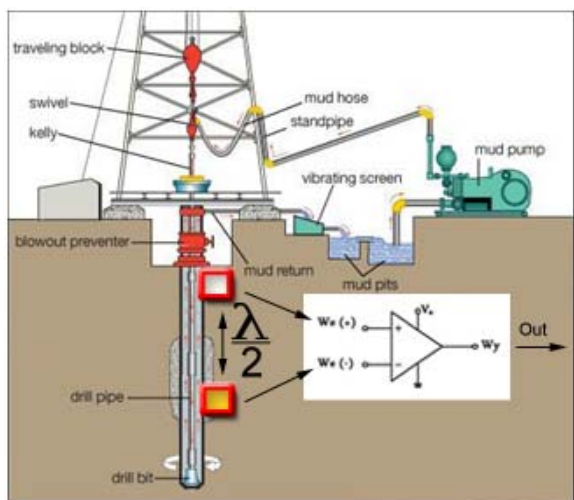
Najprostszy sposób, za pomocą przewodów elektrycznych łączących oba ośrodki, ma wiele wad, i dlatego w praktyce nie jest stosowany. System akustycznego wzbudzenia fal w stalowej rurze płuczkowej przez układ strun jest obciążony wpływem pasożytniczych efektów falowych na sygnał użyteczny. Z tego powodu nie jest praktycznie stosowany. System oparty na emisji fal elektromagnetycznych przez wierconą formację do powierzchni wymaga wykorzystania anten odbiorczych umieszczonych wzdłuż poziomej strefy wierniczenia na znacznych głębokościach. I to jest największą przeszkodą w wykorzystaniu tego systemu.

Konstrukcja „inteligentnych” rur płuczkowych została opracowana w 2012 roku. Rury z wbudowanymi kablami koncentrycznymi, które poprzez mechaniczne sprzężenie indukcyjne na końcach rur (Intelliserv System), pozwalają uzyskać bardzo szybką transmisję danych (do 5700bitów/s), co umożliwia bardzo efektywne przekazywanie danych pomiędzy dolnym zespołem wierniczym, a powierzchnią.

Jednak najczęściej stosowanym sposobem transmisji sygnałów jest metoda Impulsowej Telemetrii Błotnej (Mud Pulse Telemetry, MPT) [3], [4], [5]. Wykorzystuje ona ciągły obieg wody płuczkowej w kolumnie płuczki wierniczej. Informacja jest nanoszona zwykle w postaci kodu binarnego (0, 1) realizowanego poprzez zmianę ciśnienia wody płuczkowej.

Metoda Impulsowej Telemetrii Błotnej

Woda płuczkowa jest tłoczona przez pompy szlamowe rurami o średnicy najczęściej 125mm. Woda w postaci szlamu wraca na powierzchnię w kanale o przekroju pierścienia położonego na zewnątrz stalowej rury płuczkowej. Średnica zewnętrzna pierścienia wynosi 150mm. Powracający szlam przenosi informację w postaci fal ciśnienia. Fale ciśnienia są wytwarzane przez impulsator (np. piezoelektryczny siłownik, lub mechaniczne zaworki) zmieniający wielkość przepływu wody płuczkowej. W tym będącym w ciągłym ruchu szlamie na powierzchnię wracają fale ciśnienia z prędkością 1500m/s. Fale te są zamieniane przez przetwornik ciśnienia na sygnały elektryczne, które są przekazywane do ośrodka sterowania procesem wierniczenia. Jednostka rejestrująca fale ciśnienia jest zwykle złożona z dwóch piezoelektrycznych czujników ciśnienia umieszczonych w pionowej strefie wierniczenia w odległości połowy długości fali ciśnienia od siebie. Na rys. 5 przedstawiono układ czujników ciśnienia oraz ideę elektrycznego różnicowego układu pomiarowego zmian ciśnienia wody płuczkowej. Transmisja danych w tej metodzie jest wolna, kilka bitów na sekundę.



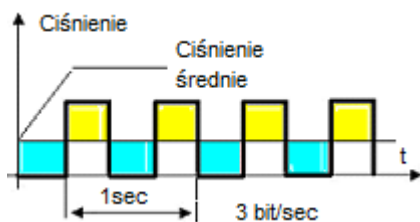
Rys.5. Układ do pomiaru zmian ciśnienia wody płuczkowej

Zauważmy, że powracający na powierzchnię szlam błotny wypływa na określoną wysokość. Wysokość wypływu zależy od ciśnienia panującego w szlamie. Dlatego przez pomiar zmian wysokości wypływu wody płuczkowej możemy mierzyć zmianę ciśnienia, a tym samym rejestrować sygnały informacyjne naniesione na wypływającą wodę płuczkową.

Do pomiaru zmian wysokości wypływu szlamu można wykorzystać czujnik przyśpieszenia z akustyczną falą powierzchniową (AFP) [6], [7]. Sposób jego wykorzystania przedstawimy w następnym punkcie.

Wykorzystanie czujników przyśpieszenia z AFP do odczytu informacji zawartej w falach ciśnienia.

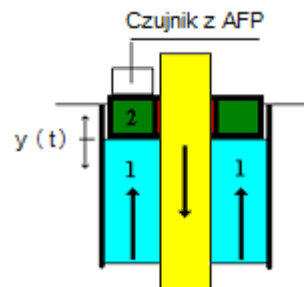
Dla prostoty przedstawienia założymy, że informacja jest niesiona na wypływającą wodę płuczkową w postaci binarnej dwustanowej (0, 1). Każdy stan opisany jest przez wysoką bądź niską wartość ciśnienia. Długość każdego bitu jest identyczna. Przykład sygnału (0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1) o szybkości transmisji 3 bitów/sekundę przedstawia rysunek nr 6.



Rys. 6. Zmiana ciśnienia w wodzie płuczkowej w czasie

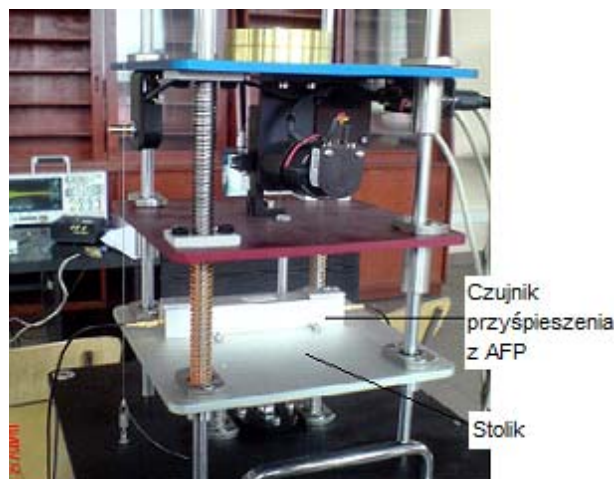
Rzeczywisty sygnał informacyjny jest zaburzony przez sygnały zmian ciśnienia wywołanego pracą pomp szlamowych oraz sygnały związane z efektami fizycznymi towarzyszącymi rozprzestrzenianiu się fal ciśnienia (tłumienie, odbicia, dyspersja). Te sygnały pasożytnicze mogą znacznie deformować rzeczywisty sygnał informacyjny. Przy dalszych rozważaniach pominiemy sygnały pasożytnicze. Do rozważań przyjmijmy idealny sygnał informacyjny w postaci przedstawionej na rys. 6. Dla odczytania tego typu sygnału wystarczy znajomość czasu występowania wzrostu i obniżania ciśnienia w wypływającym szlamie. Do pomiaru tych parametrów sygnału można wykorzystać czujnik przyśpieszenia z AFP [6]. Jeśli na powierzchni wypływającego szlamu (rys. 7) umieścimy pływak (2) z czujnikiem przyśpieszenia z AFP, to energia fal ciśnienia (1) dochodzących do pływaka będzie powodowała jego ruch w kierunku pionowym.

Wielkość wychylenia czujnika będzie proporcjonalna do wielkości fal ciśnienia dochodzących do pływaka.



Rys. 7. Praca czujnika przyśpieszenia z AFP w metodzie MPT

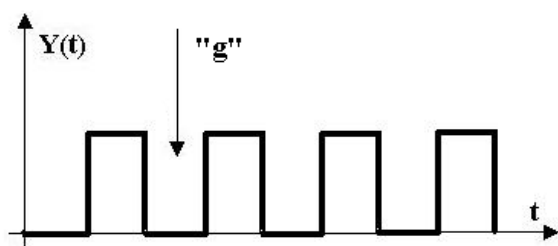
Czujnik umieszczony na pływaku będzie poddany działaniu przyśpieszenia związanego z ruchem pływaka w górę i w dół oraz stałego przyśpieszenia ziemskiego. Jeśli pływak porusza się w górę to wymienione przyśpieszenia sumują się, a jeśli w dół, to odejmują się. Zatem amplituda sygnału wyjściowego z czujnika podczas jego ruchu w górę będzie większa niż podczas ruchu w dół. Ta właściwość pozwala na rozróżnienie kierunku zmian ciśnienia w wodzie płuczkowej. Jeśli potrafimy rozróżnić te sygnały to odczytamy zmiany bitu w przekazywanym sygnale informacyjnym. Czujnik przyśpieszenia z AFP przedstawiony w pracy [7] posiada właściwości które pozwalają na rozróżnienie jego ruchu w górę lub w dół. Przedstawimy je skrótowo. Sygnał wyjściowy z czujnika jest proporcjonalny do wielkości mierzonego przyśpieszenia. Jego czułość dynamiczna przy odpowiednio dobranej częstotliwości rezonansowej czujnika jest wielokrotnie wyższa od czułości statycznej. Odpowiedź impulsowa czujnika ma kształt eksponentalnie zanikającej sinusoidy o częstotliwości rezonansowej. Jej parametry można odpowiednio dobrać przez konstrukcję czujnika. Dla potwierdzenia tych rozważań wykonano badania eksperymentalne. Stanowisko do badań czujnika przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Stanowisko do badań czujnika przyśpieszenia z AFP

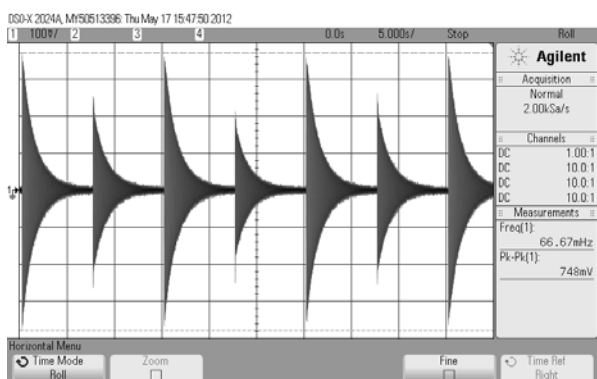
Przedstawia on stół, którego ruch w pionie jest sterowany komputerowo. Na stoliku umieszczono czujnik przyśpieszenia z AFP o częstotliwości rezonansowej 151Hz. Ruch stolika w czasie w postaci okresowych przemieszczeń w górę i w dół jest opisany przez funkcję $Y(t)$ i przedstawiony na rys. 9. Ruch ten jest opisany identyczną funkcją jak zmiana ciśnienia w wodzie płuczkowej w czasie (rys. 6). Zmiana położenia stolika ma

określony czas narastania i opadania. Ruch obudowy czujnika jest identyczny jak ruch stolika. W każdym z tych czasów wystąpi przyspieszenie i opóźnienie ruchu stolika. Zmiana wielkości przyspieszenia stolika ma charakter impulsowy, co powinno spowodować generację odpowiedzi impulsowej czujnika.



Rys. 9. Funkcja opisująca położenie czujnika w czasie

Układ pomiarowy czujnika został przedstawiony w pracy [7]. Sygnał wyjściowy z czujnika rejestrowano na oscyloskopie. Na rysunku 10 przedstawiono eksperymentalny sygnał wyjściowy z czujnika podczas kolejnych ruchów w górę i w dół stolika.



Rys. 10. Sygnał wyjściowy z czujnika podczas jego ruchu w górę i w dół

Każdy ruch obudowy czujnika w górę lub w dół powoduje generację odpowiedzi impulsowej czujnika drgań z AFP. Ma ona postać eksponentalnie zanikającej z czasem funkcji o częstotliwości rezonansowej czujnika [7]. Różnica amplitud przy ruchu w dół i w górę jest widoczna. Jej wielkość zależy od czułości dynamicznej czujnika. Sygnał wyjściowy z czujnika jest sumą odpowiedzi impulsowych czujnika przesuniętych w czasie. Wielkość przesunięcia to czas pomiędzy kolejnymi ruchami stolika. Wielkość opóźnienia pomiędzy kolejnymi odpowiedziami impulsowymi czujnika pozwala na określenie ilości zawartych między nimi identycznych bitów informacyjnych. Te dwie dane umożliwiają odczytanie sygnału informacyjnego związanego z ruchem czujnika. Wynik badania jest potwierdzeniem możliwości wykorzystania czujnika przyspieszenia z AFP w impulsowej teledetekcji do odbioru sygnałów informacyjnych.

Wnioski

W pracy przedstawiono koncepcję wykorzystania czujnika przyspieszenia z AFP w impulsowej teledetekcji. Inspiracją w podjęciu tej tematyki była propozycja Texas Institute of Science (TxIS) [1] poszukiwania nowych rozwiązań pozwalających zwiększyć szybkość transmisji w aktualnie stosowanej metodzie impulsowej teledetekcji. Zgłoszonym rozwiązaniem tak postawionego problemu była przedstawiona w pracy metoda oparta o wykorzystanie czujnika przyspieszenia z AFP. Wykonane badania eksperymentalne potwierdziły możliwość wykorzystania tego sposobu odbioru sygnałów impulsowych stosowanych w teledetekcji. Warunkiem właściwej pracy czujnika jest rozróżnienie kolejnych zmian wysokości położenia czujnika. Wymaga to doboru: odpowiedniej szybkości zanikania odpowiedzi impulsowej czujnika, aby rozróżnić kolejne zmiany wysokości oraz odpowiedniej wielkości jego czułości dynamicznej, aby rozróżnić kierunek zmian wysokości. Opisane wielkości są parametrami czujnika drgań z AFP i można je w szerokim zakresie dobrać podczas projektowania konstrukcji czujnika. W impulsowej teledetekcji bardziej złożonej strukturze [8]. Również w tym przypadku można wykorzystać czujnik przyspieszenia z AFP do ich odbioru.

LITERATURA

- [1] HDR MPT - Mud Pulse Telemetry (MPT) with higher data rates than 30 bits/sec also in difficult conditions Opracowanie Texas Institute of Science, *informacja prywatna*, 2013.
- [2] Research Program Publication, Project Internal No: 092-017-001, Texas Institute of Science, *informacja prywatna*, 2014.
- [3] Montaron B. A., Hache J-M. D., Voisin B., Improvements in MWD Telemetry: "The Right Data at the Right Time", *Society of Petroleum Engineers, Inc., SPE Feb.* 1993.
- [4] Patton B. J., Gravley W., Development and successful testing of continuous wave logging while drilling telemetry system, *SPE 6/57 Oct.* 1976.
- [5] Klotz C., Bond P., Wasserman I., Pregnitz S., A New Mud Pulse Telemetry System for Enhanced MWD/LWD Applications, *IADC/SPE Drilling Conference held in Orlando, Florida, U. S. A., 4-6 March* 2008.
- [6] Filipiak J., Solarz L., Steczko G., SAW Vibration Sensor, *Sensors 11*, (2011), 11809-11832.
- [7] Filipiak J., Steczko G., Kostrzewa S., Wcisło Ł., Parametry czujników przyspieszenia z akustyczną falą powierzchniową, *Przegląd Elektrotechniczny* nr 1/2015.
- [8] Desbrandes R., Bouroyne A. T., Carter J. A., MWD Transmission Data Rates Can be Optimized, *Petroleum Engineer International*, June 1987.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Jerzy Filipiak, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroniki i Systemów Sterowania, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: filipiak1947@gmail.com, Grzegorz Steczko F.H.U. Gem s.c. ul. Starogardzka 10, 42-200 Częstochowa, E-mail gem@gemsc.com.pl, Sebastian Kostrzewa, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroniki i Systemów Sterowania, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: gitarzystatnb@gmail.com.