

doi:10.15199/48.2017.01.34

Analiza parametrów czujników przyśpieszenia z akustyczną falą powierzchniową do zastosowań w telemetrii błotnej

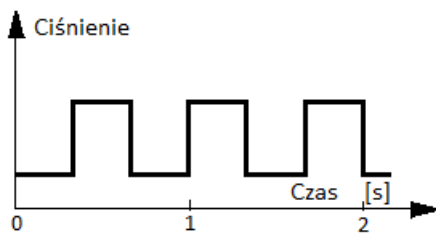
Streszczenie. W pracy przedstawiono teoretyczną analizę czujnika przyśpieszenia z akustyczną falą powierzchniową (AFP). Wyniki analizy mogą być wykorzystane w impulsowej telemetrii błotnej (ITB) podczas wierceń w formacjach łupkowych. Bardzo ważną sprawą jest dostosowanie czujnika do szybkości transmisji sygnałów informacyjnych w ITB. Uzyskane wyniki pokazują, że możliwe jest wykonanie projektu czujnika o parametrach odpowiedzi impulsowej dostosowanej do szybkości przekazywania informacji w systemie ITB.

Abstract. In the paper was presented the theoretical analyze of the surface acoustic wave (SAW) acceleration sensor. This analyze can be used in a mud pulse telemetry (MUD) during drilling in shale formations. For this application optimization of the transmission speed of information signals from the sensors for MUD system are very important. Presented results poof that it is possible to design SAW acceleration sensor with proper impulse response parameters adapted to the transmission speed for the MUD system. (Analysis of parameters of the surface acoustic wave acceleration sensors applied to mud telemetry)

Słowa kluczowe: impulsowa telemetria błotna, akustyczne fale powierzchniowe, czujnik przyśpieszenia
Keywords: Mud Pulse Telemetry, surface acoustic waves, acceleration sensor

Wstęp

Realizacja procesu wiercenia w formacjach łupkowych w poszukiwaniu gazu i ropy wymaga zapewnienia komunikacji pomiędzy dolnym zespołem wiertniczym, a znajdującym się na powierzchni centrum sterowania. Najczęściej do tego celu jest wykorzystywana metoda Impulsowej Telemetrii Błotnej. Polega ona na naniesieniu informacji w postaci zmian ciśnienia w wodzie płuczkowej i jej transmisji przez ciągły obieg wody płuczkowej w kolumnie wiertniczej. Naniesienia informacja może mieć postać kodu binarnego, w uproszczeniu przedstawionego na rys.1.

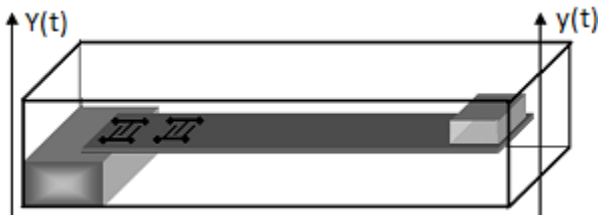


Rys. 1. Zmiana ciśnienia w wodzie płuczkowej przekazywana z prędkością 3bit/sek.

Do jej odczytu wykorzystuje się piezoelektryczne czujniki ciśnienia [1]. W pracy [2] zaproponowano, aby do odczytu tej informacji wykorzystać czujnik przyśpieszenia z akustyczną falą powierzchniową (AFP).

Zasada działania czujnika przyśpieszenia z AFP

Ustrojem pomiarowym czujnika przyśpieszenia z AFP jest linia opóźniająca z AFP, wykonana na powierzchni płytki z materiału piezoelektrycznego (rys. 2).



Rys. 2. Podstawowa struktura czujnika przyśpieszenia z AFP.

Płytkę z jednej strony jest sztywno zamocowana do obudowy czujnika. Na jej drugim swobodnym końcu może być umieszczona masa sejsmiczna. Na górnej powierzchni

płytki wykonane są dwa współpracujące przetworniki międzypalczaste. Jeden z nich służy do wzbudzenia akustycznej fali powierzchniowej. Drugi zaś do jej zamiany na sygnał elektryczny. Tworzą one linię opóźniającą z AFP w postaci czwórnika. Naprężenia i odkształcenia powstające w płytce czujnika pod wpływem ruchu obudowy czujnika zmieniają prędkość i drogę propagacji AFP. Prowadzi to do zmiany opóźnienia linii opóźniającej z AFP o wielkość ΔT . Zmiana opóźnienia zmienia fazę sygnału wysokiej częstotliwości (Ω_0) przechodzącego przez linię opóźniającą z AFP o wielkość $\Delta\varphi$ określonej zależnością:

$$(1) \quad \Delta\varphi = 2\pi\Omega_0\Delta\tau$$

Częstotliwość zmian fazy jest równa częstotliwości drgań płytki czujnika. Amplituda zmian fazy będzie proporcjonalna do amplitudy drgań płytki czujnika. Dlatego poprzez pomiar zmiany fazy sygnału wysokiej częstotliwości (w.cz.) możemy wyznaczyć parametry ruchu podłoża do którego czujnik jest zamocowany.

W anizotropowym, piezoelektrycznym podłożu w stanie naprężeń zarówno prędkość fali powierzchniowej jak i jej zmiany mogą być obliczane jedynie numerycznie. Teoretyczne wyznaczenie zmian opóźnienia fali powierzchniowej w funkcji przemieszczenia obudowy czujnika jest procesem żmudnym i kłopotliwym. Wynika to konieczności budowy skomplikowanego modelu matematycznego opisującego powyższy proces. Wykonanie czujnika drgań z AFP o wymaganych parametrach bez znajomości tych powyższych zależności jest niemożliwe. Rozwiązaniem tego problemu jest opracowanie modeli uproszczonych, umożliwiających ilościowy opis wymienionych wielkości fizycznych. Zauważmy, że zmiana opóźnienia fali powierzchniowej w drgającej płytce czujnika jest proporcjonalna do:

$$(2) \quad \Delta\tau \propto [y(t) - Y(t)]$$

gdzie: $Y(t)$ – przemieszczenie obudowy czujnika, $y(t)$ – przemieszczenie swobodnego końca płytki.

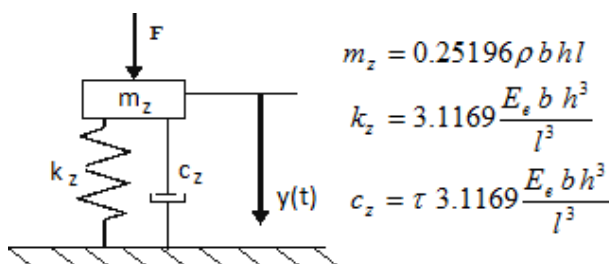
Zatem przesunięcie fazy sygnału w.cz. przechodzącego przez drgający czujnik jest proporcjonalne do zmian wielkości ugięcia swobodnego końca płytki.

$$(3) \quad \Delta\varphi \propto [y(t) - Y(t)]$$

Jeśli potrafimy opisać drgania swobodnego końca płytki czujnika, to uzyskamy opis zmian sygnału pomiarowego systemu w czasie, a to pozwoli na analizę pracy czujnika przyśpieszenia z AFP.

Model matematyczny ruchu płytki czujnika przyśpieszenia z AFP

Do analizy pracy czujnika przyśpieszenia z AFP w Impulsowej Telemetrii Błotnej wykorzystamy model czujnika opracowany w pracy [3]. Model otrzymano przez kolejne uproszczenia pełnego opisu ruchu anizotropowej lepko-sprężystej płytki czujnika. Jest to układ o jednym stopniu swobody złożony z masy (m_z), sprężyny o współczynniku sprężystości k_z oraz tłumika o współczynniku tłumienia c_z . Na rys. 3 przedstawiono model drgań anizotropowej płytki czujnika. Wielkości opisujące wartości elementów modelu zależą od parametrów materiału płytki (E_e - ekwiwalentny moduł Younga, τ - ekwiwalentny moduł Poissona) oraz geometrii płytki (b - szerokość, h - grubość, l - długość płytki).



Rys. 3. Model opisujący ruch końca płytki czujnika.

Jeśli na swobodnym końcu płytki jest umieszczona sejsmiczna masa skupiona (m), to wielkość m_z , jest określona zależnością:

$$(4) \quad m_z = 0.25196 \rho b h l + m$$

Pozostałe wielkości elementów układu zastępczego nie zmieniają się.

Równanie ruchu masy w układzie zastępczym ma postać:

$$(5) \quad m_z \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + c_z \frac{dy(t)}{dt} + k_z y(t) = F(t)$$

Jeżeli wprowadzimy zależności:

$$(6) \quad \omega_0^2 = \frac{k_z}{m_z}, \quad \tau = \frac{c_z}{k_z}$$

To równanie (5) przyjmie postać:

$$(7) \quad \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \omega_0^2 \tau \frac{dy(t)}{dt} + \omega_0^2 y(t) = \frac{F(t)}{m_z}$$

Rozwiązaniem tego równania jest funkcja, którą możemy przedstawić w postaci zależności:

$$(8) \quad y(t) = A \exp\left[-\frac{\omega_0^2 \tau}{2}\right] \sin[\omega_r(t + \alpha)] - \frac{1}{m_z \omega_r} \int_0^t F(\xi) \exp\left[-\frac{\omega_0^2 \tau(t - \xi)}{2}\right] \sin[\omega_r(t - \xi)] d\xi$$

gdzie stałe: A oraz α oblicza się z warunków początkowych.

W obu składnikach zależności (8) występuje funkcja:

$$(9) \quad y_\delta(t) = A e^{-\frac{\omega_0^2 \tau}{2} t} \sin(\omega_r t)$$

Jest ona iloczynem funkcji harmonicznnej i funkcji tłumionej eksponentalnie z czasem. Częstotliwość funkcji harmonicznnej jest częstotliwością rezonansową płytki czujnika, która jest określona zależnością:

$$(10) \quad \omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{\omega_0^2 \tau^2}{4}}$$

gdzie:

$$(11) \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k_z}{m_z}} = \left(\frac{h}{l^2}\right) \sqrt{\frac{E_e}{12 \rho} \frac{3,5172}{\sqrt{1+4r}}}$$

jest częstotliwością własną drgań płytki, - r jest to stosunek masy skupionej do masy płytki czujnika.

W przypadku braku tłumienia materiałowego ($\tau=0$) częstotliwość rezonansowa jest równa częstotliwości własnej płytki.

Funkcja przedstawiona zależnością (9) opisuje zarówno odpowiedź impulsową czujnika jak i jego drgania swobodne. Zatem zmiana fazy sygnału o wysokiej częstotliwości Ω_0 przechodzącego przez drgający czujnik, którego ruch jest opisany zależnością (2) jest sumą:

- splotu odpowiedzi impulsowej płytki i składowej przyśpieszenia działającej na czujnik,
- drgań tłumionych o częstotliwości rezonansowej płytki czujnika.

Podstawowymi parametrami modelu przedstawionego na rys.3 są charakterystyki częstotliwościowe. Amplitudową charakterystykę częstotliwościową płytki czujnika określa zależność:

$$(12) \quad H(\omega) = y_{stat} \cdot \sqrt{\frac{1 + (\omega\tau)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2\right]^2 + (\omega\tau)^2}}$$

gdzie: y_{stat} jest statycznym ugięciem płytki.

Fazową charakterystykę częstotliwościową płytki czujnika opisuje zależność:

$$(13) \quad \psi(\omega) = \text{artg}\left(\frac{\omega\tau}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}\right)$$

Statyczne ugięcie płytki wprowadzone w zależności (12), jest to wielkość ugięcia końca płytki pod wpływem stałej siły. Oszacujemy jej wielkość dla płytki umieszczonej w polu grawitacyjnym. Załóżmy, że obudowa czujnika pozostaje w spoczynku, a na czujnik działa siła ciężkości ($F=mg$), gdzie g jest wartością przyśpieszenia ziemskiego). Wtedy równanie (7) przyjmie postać:

$$(14) \quad \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \omega_0^2 \tau \frac{dy(t)}{dt} + \omega_0^2 y(t) - g = 0 \quad (9)$$

Wprowadzając nową zmienną $z(t)$:

$$(15) \quad y(t) = z(t) + y_{stat}$$

otrzymujemy równanie:

$$(16) \quad \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + \omega_0^2 \tau \frac{dz(t)}{dt} + \omega_0^2 z(t) + \omega_0^2 y_{stat} - g = 0$$

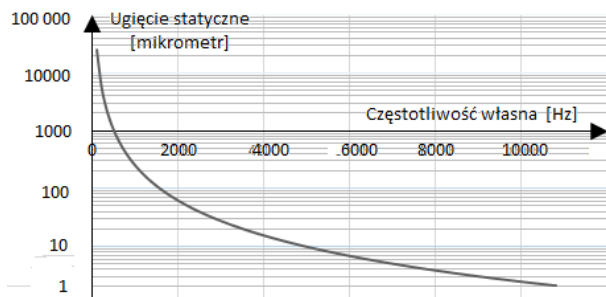
Dla wartości

$$(17) \quad y_{stat} = \frac{g}{\omega_0^2}$$

równanie (14) przyjmie postać:

$$(18) \quad \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + \omega_0^2 \tau \frac{dz(t)}{dt} + \omega_0^2 z(t) = 0$$

Jest to klasyczna postać równania drgań swobodnych układu o jednym stopniu swobody. Wielkość ugięcia statycznego płytki y_{stat} (17) jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu częstotliwości własnej płytki czujnika (11). Zmianę ugięcia statycznego płytki w funkcji częstotliwości własnej płytki przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Zależność ugięcia statycznego płytki w funkcji jej częstotliwości własnej.

Ze wzrostem częstotliwości własnej płytki czujnika jej ugięcie statyczne szybko maleje. Przy zmianie częstotliwości własnej od 10Hz do 10kHz ugięcie statyczne płytki maleje 10000 razy. Czułość statyczna czujnika jest proporcjonalna do wielkości statycznego ugięcia płytki (2). Dlatego jej zależność od częstotliwości własnej będzie identyczna, jak zależność wielkości ugięcia statycznego płytki

W Impulsowej Telemetrii Błotnej zmiana ciśnienia w wodzie płuczkowej ma charakter uderzenia (rys.1). Dlatego rozważymy ruch układu przedstawionego na rys.2 wywołany przez uderzenie. Teoretycznie, uderzenie jest to wymuszenie, które dla $t \leq 0$ nie działa na układ, a dla $t \geq 0$ jest stałe. Układ wykonuje wówczas drgania określone wzorem [4]:

$$(19) \quad y(t) = y_{stat} \left[1 - \frac{\omega_0}{\omega_r} e^{-\frac{\omega_0^2 \tau}{2} t} \sin(\omega_r t + \phi) \right]$$

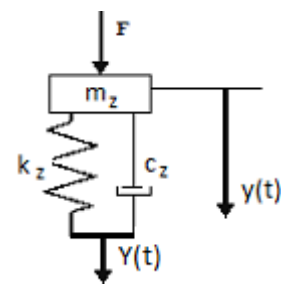
Cechą charakterystyczną uderzenia jest to, że powodowane nimi zaburzenie jest co najwyżej równe dwukrotnej wartości zaburzenia powodowanego przez statyczne działanie źródła o tej samej wartości jak maksimum uderzenia. W miarę upływu czasu układ dąży do stanu ustalonego odpowiadającego statycznemu działaniu wymuszenia. Warto zwrócić uwagę, że:

1. Uderzenie pobudza ruch układu opisany jego odpowiedzią impulsową (9),
2. Wielkość odpowiedzi impulsowej jest proporcjonalna do wielkości uderzenia.

Przedstawione powyżej zależności opisują podstawowe cechy mechaniki ruchu płytki czujnika przyśpieszenia z AFP zarówno w dziedzinie czasu jak i w dziedzinie częstotliwości. Mają one bezpośredni wpływ na parametry czujnika. Zatem do podstawowych parametrów czujnika możemy zaliczyć: w dziedzinie częstotliwości amplitudową (12) i fazową (13) charakterystykę częstotliwościową, a w dziedzinie czasu odpowiedź impulsową (9) oraz ugięcie statyczne płytki (17). Parametry w dziedzinie czasu i częstotliwości są ze sobą związane przez transformatę Fouriera. Wymienione parametry w sposób jawny opisane są zależnościami w funkcji geometrii płytki oraz właściwości mechanicznych materiału płytki. A to ułatwia analizę konstrukcji czujnika przyśpieszenia z AFP do pracy w Impulsowej Telemetrii Błotnej. Analiza pracy czujnika powinna doprowadzić do określenia jego parametrów pozwalających na jego pracę w impulsowej telemetrii błotnej o możliwie największej prędkości transmisji.

Analiza ruchu płytki czujnika przyśpieszenia z AFP w impulsowej telemetrii błotnej

Jeśli czujnik umieścimy na powierzchni swobodnej wypływającego szlamu, to ruch jego obudowy będzie opisany funkcją $Y(t)$. Do przeprowadzenia analizy jego ruchu wykorzystamy model matematyczny czujnika przyśpieszenia z AFP przedstawiony na rys. 5. Ruch płytki czujnika jest spowodowany ruchem jego obudowy $Y(t)$ oraz działaniem siły ciężkości ($m_z g$).



Rys. 5. Model pracy czujnika przyśpieszenia z AFP w Impulsowej Telemetrii Błotnej.

Równanie ruchu masy w układzie zastępczym będzie miało postać:

$$(20) \quad \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{c_z}{m_z} \frac{d}{dt} [y(t) - Y(t)] + \frac{k_z}{m_z} [y(t) - Y(t)] = g$$

Wprowadzając nową zmienną $z(t)$, która opisuje przemieszczenie końca płytki względem obudowy czujnika:

$$(21) \quad z(t) = y(t) - Y(t)$$

otrzymamy równanie:

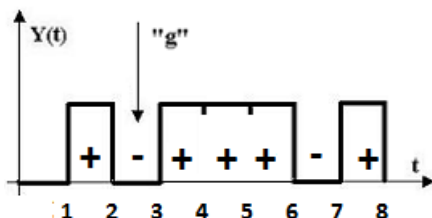
$$(22) \quad \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + \omega_0^2 \tau \frac{dz(t)}{dt} + \omega_0^2 z(t) = \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} + g$$

Jego rozwiązanie można przedstawić w postaci:

$$(23) \quad z(t) = A \exp\left[-\frac{\omega_0^2 \tau}{2} t\right] \sin[\omega_r(t + \alpha)] + \frac{g}{\omega_0^2} - \frac{1}{\omega_r} \int_0^t \ddot{Y}(\xi) \exp\left[-\frac{\omega_0^2 \tau}{2} (t - \xi)\right] \sin[\omega_r(t - \xi)] d\xi$$

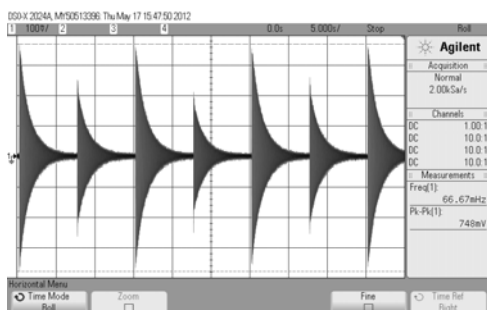
Opisuje ono ruch swobodnego końca płytki spowodowany ruchem obudowy czujnika z zadanymi warunkami początkowymi w ziemskim polu grawitacyjnym.

Czujnik przyśpieszenia z AFP w Impulsowej Telemetrii Błotnej powinien odczytać informację w postaci zmian ciśnienia w wodzie płuczkowej. Fale ciśnienia zmieniają poziom powierzchni swobodnej szlamu. Podczas pracy w Impulsowej Telemetrii Błotnej przykładowy ruch obudowy czujnika przyśpieszenia z AFP $Y(t)$ może mieć postać przedstawioną na rys. 6. W uproszczeniu, możemy założyć, że jest to skokowa, nieregularna zmiana położenia obudowy czujnika pomiędzy dwoma poziomami. Zmiana odbywa się w polu grawitacyjnym (stałe przyśpieszenie g). Funkcja $Y(t)$ zawiera informację przesyłaną przez wodę płuczkową. Jej odczytanie jest możliwe jeśli zarejestrujemy czas każdej kolejnej zmiany poziomu położenia czujnika.



Rys. 6. Ruch obudowy czujnika podczas pracy w Impulsowej Telemetrii Błotnej.

Czas trwania każdego bitu jest identyczny. Jeśli dla sygnału przedstawionego na rys. 6, znajdziemy wielkości czasu oznaczone cyframi: 1, 2, 3, 6, 7, 8, to potrafimy odczytać sygnał w postaci: (+ - + + + - +). Wiemy, że sygnał wyjściowy z czujnika to ciąg odpowiedzi impulsowych wzbudzonych w momencie zmiany położenia obudowy czujnika. Odczytanie sygnału informacyjnego w Impulsowej Telemetrii Błotnej sprowadza się do odczytu czasu kolejno wzbudzonych odpowiedzi impulsowych czujnika przyśpieszenia z AFP. Potwierdzeniem tej koncepcji są wyniki badań eksperymentalnych przedstawione na rys. 7 [2].



Rys. 7. Sygnał wyjściowy z czujnika podczas cyklicznego ruchu w górę i w dół jego obudowy.

Sygnał wyjściowy z czujnika rejestrowano na oscyloskopie podczas cyklicznych ruchów w górę i w dół jego obudowy. Ze względu na przyśpieszenie ziemskie amplitudy odpowiedzi impulsowych wzbudzonych podczas ruchu obudowy czujnika w górę i w dół mają różne amplitudy. Sygnał wyjściowy z czujnika jest sumą odpowiedzi impulsowych czujnika przesuniętych w czasie pomiędzy kolejnymi ruchami stolika, który wynosił 7 sekund. Relatywnie długi czas powoduje, że kolejna odpowiedź impulsowa jest wzbudzana w momencie kiedy amplituda

poprzedniej jest bardzo mała. Wyniki badań eksperymentalnych potwierdziły pomysł wykorzystania czujnika przyśpieszenia z AFP w impulsowej telemetrii błotnej, a także sposób matematycznego opisu pracy czujnika przyśpieszenia z AFP. Siedmiosekundowy czas zmian położenia czujnika jest zbyt długi w stosunku do długości bitów stosowanych w telemetrii błotnej. Aktualnie prowadzone są prace w kierunku zwiększenia prędkości przekazywania informacji w zakresie 30bitów/sek [5].

Wnioski

W pracy przedstawiono sposób modelowania czujnika przyśpieszenia z AFP w zastosowaniu do impulsowej telemetrii błotnej. Uzyskano jawne zależności opisujące sygnał wyjściowy z czujnika przy wymuszeniach o charakterze kolejnych uderzeń. Stanowi go ciąg odpowiedzi impulsowych wzbudzonych w momencie zmiany położenia obudowy czujnika. Odpowiedź impulsowa jest iloczynem funkcji harmonicznej i funkcji tłumionej eksponentalnie z czasem. Częstotliwość funkcji harmonicznej jest częstotliwością rezonansową płytki czujnika. Amplituda odpowiedzi impulsowej jest proporcjonalna do statycznej statycznej ugięcia płytki czujnika. Wszystkie te wielkości zależą od częstotliwości własnej płytki czujnika oraz ekwiwalentnego współczynnika tłumienia materiału płytki. Praca czujnika przyśpieszenia z AFP w impulsowej telemetrii błotnej polega na rozróżnieniu kolejnych zmian wysokości położenia czujnika. Wymaga to doboru: odpowiedniej szybkości zanikania odpowiedzi impulsowej czujnika, aby rozróżnić kolejne zmiany wysokości oraz odpowiedniej wielkości czułości statycznej czujnika, aby rozróżnić kierunek zmian wysokości. Dobór parametrów odpowiedzi impulsowej czujnika drgań z AFP do wybranej szybkości przekazywania informacji w telemetrii błotnej wykonać podczas projektowania konstrukcji czujnika, wykorzystując przedstawione wyżej zależności.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Jerzy Filipiak, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroniki i Systemów Sterowania, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: filiapiak1947@gmail.com, mgr inż. Sebastian Kostrzewa, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroniki i Systemów Sterowania, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: gitarzystalnb@gmail.com.

LITERATURA

- [1] Desbrandes R., Bouroyne A. T., Carter J. A., MWD Transmission Data Rates Can be Optimized, *Petroleum Engineer International*, June 1987.
- [2] Filipiak J., Steczko G., Kostrzewa S., Koncepcja wykorzystania czujników przyśpieszenia z akustyczną falą powierzchniową w telemetrii błotnej, *Przegląd Elektrotechniczny* nr 12/2015, 83-86.
- [3] Filipiak J., Solarz L., Steczko G., SAW Vibration Sensor, *Sensors* 11, (2011), 11809-11832.
- [4] S. Kaliski, et al., *Vibrations and Waves*, PWN – Elsevier, NY, Amsterdam, Warsaw 1992
- [5] 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.