

doi:10.15199/48.2017.12.23

Projekt czujnika przyśpieszenia z akustyczną falą powierzchniową do zastosowań w telemetrii błotnej

Streszczenie. W pracy przedstawiono projekt czujnika przyśpieszenia z akustyczną falą powierzchniową do pracy w impulsowej telemetrii błotnej (ITB). Omówiono sposób wyboru częstotliwości własnej czujnika dla określonej szybkości przekazywania informacji w ITB. Przedstawiono projekt czujnika dla wybranej częstotliwości własnej. Obliczono podstawowe parametry czujnika. Porównano je z parametrami eksperymentalnie wykonanego czujnika.

Abstract. The paper presents the design of surface acoustic wave acceleration sensor for mud pulse telemetry (MPT). It discusses how to select the sensor's own frequency for a given MPT transfer rate. The sensor design for the selected frequency was presented. The basic parameters of the sensor were calculated. They were compared with the parameters of the sensor's prototype. (**Design of Surface Acoustic Wave Acceleration Sensor for the Mud Telemetry**)

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

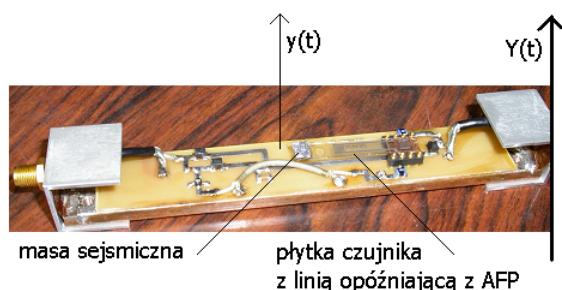
Keywords: Mud Pulse Telemetry, surface acoustic waves, acceleration sensor

Wstęp

Telemetria błotna jest wykorzystywana podczas procesu wiercenia w formacjach łupkowych w poszukiwaniu gazu i ropy. Jej celem jest zapewnienie przesyłania informacji pomiędzy dolnym zespołem wiertniczym, a centrum sterowania procesem wiercenia znajdującym się na powierzchni w odległości kilkunastu kilometrów. Do przesyłania wartości pomiarowych wykorzystuje się wodę płuczkową obiegającą system wiertniczy. Informacja jest naniesiona w postaci zmian ciśnienia w wodzie płuczkowej. Tego typu metoda jest nazywana Impulsową Telemetrią Błotną (ITB). Pomysł wykorzystania czujnika przyśpieszenia z akustyczną falą powierzchniową (AFP) [1] w ITB powstał w 2013 roku. Był on wynikiem opracowania wykonanego dla firmy Texas Instytut of Science (TxIS), jako propozycja nowego sposobu zwiększenia szybkości przekazywania informacji w ITB powyżej 30 bitów na sekundę [2].

Budowa czujnika przyśpieszenia z AFP

Na rys. 1 przedstawiono czujnik z AFP. Ustrój pomiarowy czujnika przyśpieszenia z AFP stanowi płytka z materiału piezoelektrycznego z wykonaną na jej powierzchni linią opóźniającą z AFP. Jeden koniec płytki jest sztywno zamocowany. Drugi swobodny może być obciążony masą sejsmiczną. Funkcja $y(t)$ opisuje ruch swobodnego końca płytki, a funkcja $Y(t)$ opisuje ruch obudowy czujnika wzdłuż osi prostopadłej do powierzchni płytki. W skład czujnika przedstawionego na rys. 1 wchodzi wzmacniacz kompensujący straty wnoszone przez linię opóźniającą z AFP.

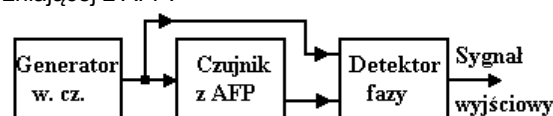


Rys.1. Czujnik przyśpieszenia z AFP.

Zasada działania czujnika przyśpieszenia z AFP

Przyśpieszenie w ruchu płytki czujnika powoduje zmianę naprężeń i przemieszczeń w płytce, co prowadzi do zmiany opóźnienia linii opóźniającej. Przez pomiar

zmian tego opóźnienia wyznaczamy składową wektora przyśpieszenia prostopadłą do płytki czujnika. Sonda pomiarowa czujnika przyśpieszenia z AFP jest przedstawiona na rys. 2. Stanowi ona opracowany i preferowany układ pomiarowy zmian opóźnienia linii opóźniającej z AFP.



Rys.2. Układ pomiarowy czujnika przyśpieszenia z AFP.

Wartość zmian opóźnienia linii jest proporcjonalna do przemieszczenia końca płytki opisanego funkcją $y(t)$. Sygnał pomiarowy o częstotliwości 74MHz otrzymano z generatora z AFP, wykonanego dla prezentowanej sondy pomiarowej. Przesunięcie fazy sygnału pomiarowego przechodzącego przez czujnik jest proporcjonalne do przyśpieszenia obudowy czujnika. Detektor fazy umożliwił uzyskanie na wyjściu sondy pomiarowej sygnału napięciowego proporcjonalnego do wielkości przesunięcia fazy sygnału pomiarowego przechodzącego przez czujnik drgań z AFP. W ten sposób na wyjściu sondy pomiarowej uzyskano sygnał napięciowy, którego wartość jest proporcjonalna do składowej wektora przyśpieszenia prostopadłej do płytki czujnika.

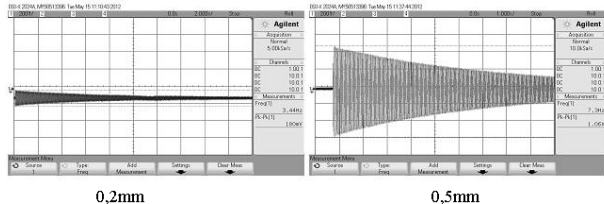
Idea wykorzystania czujnika z AFP do pracy w ITB

Idea pomysłu polega na wykryciu zmian ciśnienia wody płuczkowej docierającej na powierzchnię swobodną przez wykorzystanie odpowiedzi impulsowych czujnika wzbudzanych przy zmianie poziomu powierzchni swobodnej wody płuczkowej [3]. Odpowiedź impulsowa czujnika y_s jest iloczynem funkcji harmonicznego i funkcji tłumionej eksponentalnie z czasem (1).

$$(1) \quad y_s(t) = A e^{-\frac{\omega_0^2 \tau}{2} t} \sin(\omega_r t)$$

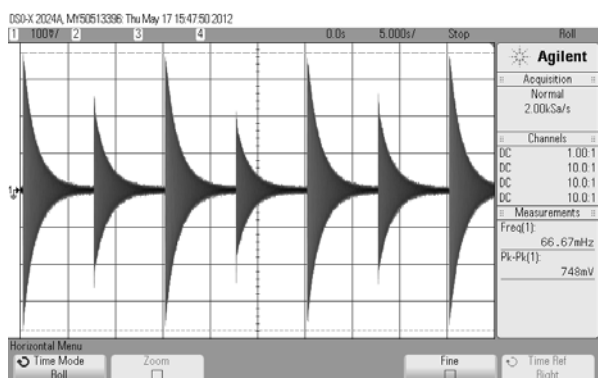
Częstotliwość funkcji harmonicznego jest częstotliwością rezonansową płytki czujnika ω_r . Szybkość zanikania odpowiedzi impulsowej zależy od częstotliwości własnej czujnika ω_0 oraz ekwiwalentnego modułu Poissona materiału płytki. Obie częstotliwości można zmieniać przez zmianę konstrukcji czujnika. Wyniki pierwszych badań laboratoryjnych wykonane przy wykorzystaniu czujnika o częstotliwości rezonansowej 29Hz potwierdziły postawioną

ideę. Na rys.3 przedstawiono odpowiedzi impulsowe czujnika przy skokowym ruchu jego obudowy. Czujnik posiada wysoką czułość. Już przy skoku obudowy 0,2mm wielkość odpowiedzi impulsowej jest położona powyżej poziomu szumów układu pomiarowego czujnika.



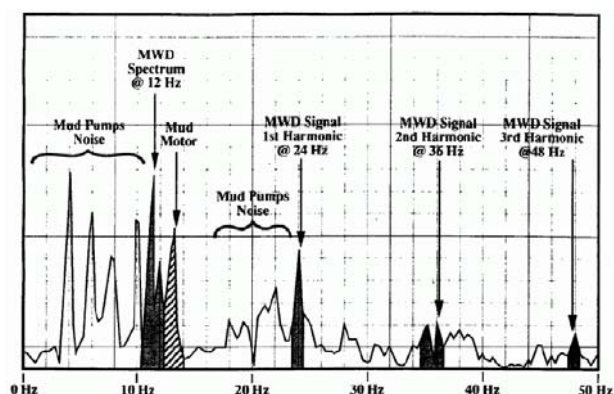
Rys. 3. Zmiana amplitudy odpowiedzi impulsowych czujnika w zależności od wielkości skoku ruchu jego obudowy.

Na rys. 4 przedstawiono odpowiedzi impulsowe czujnika przy kolejnych ruchach w górę i w dół jego obudowy. Różnica wielkości kolejnych amplitud jest spowodowana stałym przyspieszeniem ziemskim „g” sumującym się ze zmiennym przyspieszeniem obudowy czujnika.



Rys. 4. Sygnał wyjściowy z układu pomiarowego czujnika przy skokowym, cyklicznym ruchu w górę i w dół jego obudowy.

Poziom sygnałów pomiarowych w ITB jest relatywnie niski. Podczas wierceń łupkowych występują silne zakłócenia. Ich źródłami są silniki elektryczne, pompy błotne i inne urządzenia elektryczne dużych mocy. Mogą one zakłócać informacje przekazywane w ITB. Dlatego widmo sygnałów pomiarowych powinno być położone w tych obszarach częstotliwości, gdzie poziom zakłóceń jest odpowiednio niski. Na rys. 5 przedstawiono przykładowe amplitudowe widmo zakłóceń [2].



Rys. 5. Przykładowe amplitudowe widmo zakłóceń na powierzchni wiercenia [2].

Widmo sygnału pomiarowego czujników drgań z AFP jest wąskie (rzędu Hz). Może być położone w dowolnym obszarze częstotliwości.

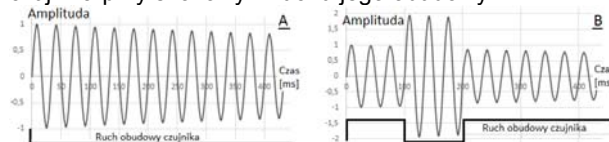
To pozwala ograniczyć wpływ zakłóceń na sygnał pomiarowy w ITB. Z tej analizy wynika, że czujniki drgań z AFP do pracy w ITB powinny się charakteryzować:

1. Szybkim zanikaniem odpowiedzi impulsowej.
2. Określoną czułością.
3. Widmem sygnału pomiarowego położonym w obszarze najniższych zakłóceń.

Dla takich wymagań przedstawimy analizę możliwości wykonania czujnika przyspieszenia z AFP.

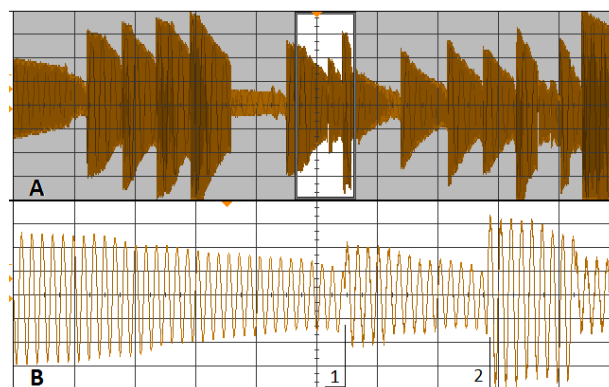
Parametry odpowiedzi impulsowej czujnika do pracy w Impulsowej Telemetrii Błotnej.

Szybkość przekazywania informacji jest jedynym ogólnie dostępnym parametrem ITB. Do analizy przyjmijmy szybkość 10 bitów na sekundę, która jest uznawana za wysoką. Dla tej szybkości długość jednego bitu wynosi 100ms. Częstotliwość własna czujnika powinna być tak dobrana, aby można rozróżnić zmianę bitu w ITB. Częstotliwość własna decyduje o częstotliwości rezonansowej odpowiedzi impulsowej oraz o szybkości jej zanikania. Sygnał wyjściowy z czujnika przy skokowym ruchu jego obudowy opisano przy wykorzystaniu teoretycznego modelu czujnika. Na rys. 6A przedstawiono fragment odpowiedzi impulsowej czujnika o częstotliwości własnej 29Hz, a na rys. 6B sygnał wyjściowy z tego czujnika przy skokowym ruchu jego obudowy.



Rys. 6. A - odpowiedź impulsowa czujnika o częstotliwości własnej 29Hz, B - sygnał wyjściowy z czujnika przy skokowym ruchu jego obudowy.

Zmiany bitów na rys. 6B są dobrze widoczne. Ale należy zauważyć, że pobudzenie kolejnej odpowiedzi impulsowej występuje w momencie zakończenia trzech pełnych okresów poprzedniej. W praktyce nie można liczyć na występowanie takiej relacji. Należy przyjąć, że pomiędzy kolejno wzbudzonymi odpowiedziami impulsowymi wystąpi różnica faz. A to może utrudnić wykrycie momentu zmian bitu. Przykładem jest przedstawiony na rys. 7A sygnał wyjściowy z czujnika, w którym zarówno czas pobudzenia kolejnej odpowiedzi impulsowej i jej amplituda są różne.



Rys. 7. Sygnał wyjściowy z układu pomiarowego czujnika – A oraz rozszerzony 10-krotnie fragment z białego pola – B.

Rys. 7B przedstawia fragment z białego pola z rys. 7A z dziesięciokrotnie rozszerzoną skalą czasu. Dla czasu oznaczonego symbolem „1” kolejna odpowiedź impulsowa jest wzbudzana w fazie ϕ rzędu 180 stopni w stosunku do poprzedniej. Natomiast dla czasu oznaczonego symbolem „2” różnica faz jest zbliżona do zera. Dla wyjaśnienia tego

efektu wykonano analizę sumy dwóch odpowiedzi impulsowych (2). Dla ułatwienia obliczeń pominięto ich tłumienie. Uzyskano wyrażenie:

$$(2) \quad A \sin(\omega_r t) + B \sin(\omega_r t + \varphi) = a \sin(\omega_r t) + b \cos(\omega_r t)$$

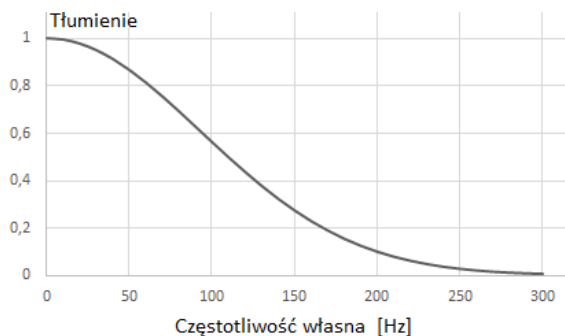
gdzie:

$$a = A + B \cos \varphi$$

(3)

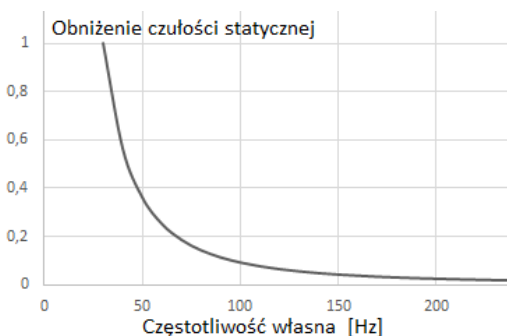
$$b = B \sin \varphi$$

Wielkości amplitud „a” oraz „b” w wyrażeniu (3) zależą od przesunięcia fazy φ . Określają one amplitudę i fazę sumy dwóch odpowiedzi impulsowych, a to wyjaśnia ich zależność od różnicy faz jej składników. Uwzględnienie tłumienia odpowiedzi impulsowych również pozwala na uzyskanie jawnych zależności amplitudy i fazy sumy dwóch odpowiedzi impulsowych. Zależności te są znacznie bardziej skomplikowane. Możliwa jest ich analiza, ale nie prowadzi ona do rozwiązania tego problemu. Wydaje się, że jedynym rozwiązaniem jest zwiększenie częstotliwości rezonansowej czujnika. Uzyskamy wtedy szybsze tłumienie odpowiedzi impulsowej czujnika. Wadą tego rozwiązania jest obniżenie czułości czujnika. Ilościowe zmiany tych wielkości przedstawiono na rys. 8 oraz rys. 9. Na rys. 8 przedstawiono zmianę tłumienia odpowiedzi impulsowej czujnika w czasie 100ms w funkcji częstotliwości własnej czujnika.



Rys. 8. Tłumienie odpowiedzi impulsowej w czasie 100ms czujnika drgań z AFP w funkcji częstotliwości własnej czujnika.

Wielkość amplitudy odpowiedzi impulsowej przy wartości częstotliwości własnej płytki 30Hz wynosi 0,95, przy 100Hz, 0,56 wartości początkowej. Natomiast na rys.9 przedstawiono zmianę czułości statycznej czujnika w funkcji jego częstotliwości własnej.



Rys. 9. Zmniejszenie czułości statycznej czujnika przyspieszenia z AFP w funkcji jego częstotliwości własnej.

Czułość statyczna maleje ze wzrostem częstotliwości drgań własnych. Szczególnie szybko maleje dla małych częstotliwości rzędu 20Hz. Dla częstotliwości własnych płytki od 60Hz do 120Hz czułość statyczna czujnika maleje czterokrotnie. Przedstawione zależności pokazują, że wybór częstotliwości własnej czujnika przyspieszenia z AFP

jest kompromisem pomiędzy wielkością tłumienia jego odpowiedzi impulsowej, a wielkością jego czułości statycznej. Dla projektowanego czujnika wybrano częstotliwość własną 91Hz, dla której w czasie trwania jednego bitu (100ms) odpowiedź impulsowa maleje do 60% wartości początkowej. Wybrane kryterium należy traktować jako przykładowe. Jego rzeczywista wielkość może być precyzyjnie określona przez uwzględnienie parametrów urządzenia rejestrującego sygnał wyjściowy z czujnika i analizującego jego zmiany.

Projekt czujnika przyspieszenia z AFP do pracy w Impulsowej Telemetrii Błotnej.

Zakres projektu czujnika po określeniu częstotliwości własnej będzie obejmował następujące zagadnienia:

1. Projekt organu pomiarowego czujnika tj. obliczenie geometrii płytki czujnika dla wybranego piezoelektrycznego podłoża.
2. Projekt linii opóźniającej.
3. Projekt podzespołów elektronicznych.

Jako materiał płytki wybrano kwarc ST o grubości $h=0,5\text{mm}$. Na podstawie opracowanego modelu [1] częstotliwość własna czujnika jest określona zależnością

$$(4) \quad \omega_0 = 3.5172 \left(\frac{h}{l^2} \right) \sqrt{\frac{E_e}{12\rho}} \sqrt{\frac{1}{1+r}} \cdot 3.9689$$

gdzie: E_e – ekwiwalentny moduł Younga, ρ – gęstość materiału płytki czujnika, l , h – długość, grubość płytki czujnika, r – stosunek masy skupionej do masy czujnika płytki.

Z powyższej zależności określono: długość płytki czujnika $l=66\text{mm}$, bez masy skupionej ($r=0$). Częstotliwość rezonansową czujnika określa zależność:

$$(5) \quad \omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{\omega_0^2 \tau^2}{4}}$$

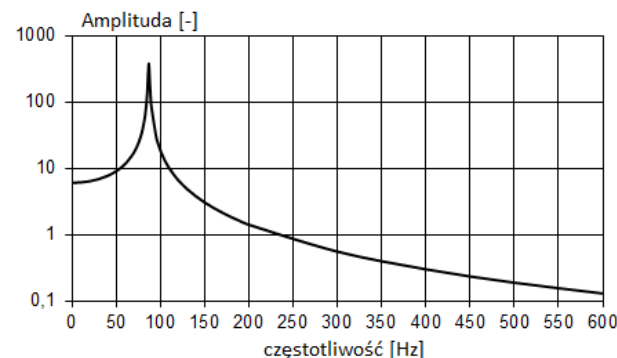
Praktycznie jest ona równa częstotliwości własnej czujnika. Amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa czujnika jest opisana zależnością [4]:

$$(6) \quad H(\omega) = y_{stat} \cdot \frac{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2\right]^2 + (\omega\tau)^2}}$$

gdzie:

$$(7) \quad y_{stat} = \frac{g}{\omega_0^2}$$

Jest wielkością statycznego ugięcia swobodnego końca płytki czujnika.



Rys. 10. Teoretyczna charakterystyka amplitudowa czujnika

Na rys. 10 przedstawiono teoretyczną amplitudową charakterystykę częstotliwościową czujnika $|H(\omega)|$. Jej cechą charakterystyczną jest występowanie zjawiska rezonansu dla częstotliwości rezonansowej 91Hz. Cechuje go pięćdziesięciokrotny wzrost amplitudy sygnału wyjściowego z czujnika w stosunku do amplitudy sygnału przy statycznym wymuszeniu.

Czułość czujnika.

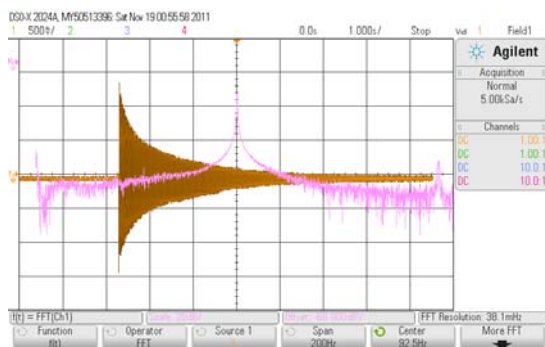
Czułość czujnika przyśpieszenia jest to stosunek zmiany wartości sygnału wyjściowego z czujnika do zmiany wartości przyśpieszenia działającego na czujnik, która powoduje zmianę sygnału wyjściowego. Czułość czujnika zmienia się ze zmianą częstotliwości mierzonego przyśpieszenia. Wielkość i charakter zmian zależy od amplitudowej charakterystyki częstotliwościowej czujnika. Dla pracy w systemie ITB interesująca jest czułość statyczna czujnika S_{stat} . Czułość statyczna czujnika jest proporcjonalna do wielkości statycznego ugięcia końca płytki y_{stat} oraz do kwadratu częstotliwości akustycznej fali powierzchniowej f_{AFP} . Wykorzystując zależność (7) można ją przedstawić w postaci:

$$(8) \quad S_{stat} \propto \left(\frac{f_{AFP}}{\omega_0} \right)^2$$

Dla przyjętej wartości częstotliwości własnej ω_0 możemy czułość statyczną czujnika zwiększyć podnosząc częstotliwość akustycznej fali powierzchniowej f_{AFP} .

Wyniki badań eksperymentalnych.

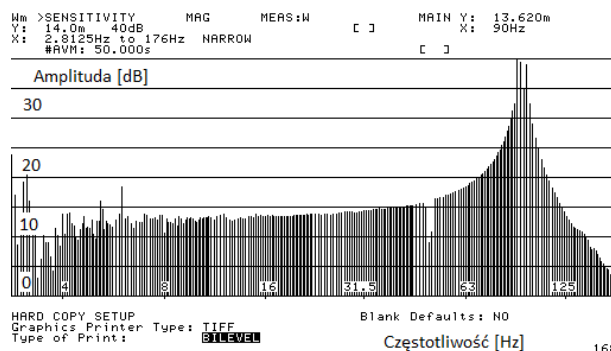
Odpowiedź impulsowa czujnika jest jego podstawowym parametrem podczas pracy w ITB. Na rys. 11 przedstawiono odpowiedź impulsową czujnika przyśpieszenia z AFP o częstotliwości rezonansowej 91Hz (kolor żółty) oraz jej widmo (kolor różowy). Otrzymano ją przez rejestrację sygnału wyjściowego z czujnika przy impulsowym uderzeniu jego obudowy. Szybkość jej tłumienia jest równa wartości teoretycznej.



Rys. 11. Odpowiedź impulsowa czujnika (kolor żółty) i jej widmo (kolor różowy)

Widmo odpowiedzi impulsowej (linia różowa rys.11), obliczono przez wykonanie jej transformaty Fouriera. Kształt widma powinien odpowiadać charakterystyce częstotliwościowej czujnika. W tym sposobie pomiaru dobrze widoczny jest obszar położony wokół częstotliwości rezonansowej czujnika. Pojawia się druga harmoniczna położona wokół częstotliwości 175Hz, której występowanie

jest pominięte przez opis teoretyczny przedstawiony na rys.10. Jej amplituda jest położona 45dB poniżej amplitudy o częstotliwości rezonansowej. Dlatego jej występowanie nie ma praktycznie żadnego znaczenia. Dużo trudniejsza jest interpretacja kształtu charakterystyki amplitudowej w obszarze położonym poniżej częstotliwości rezonansowej. Dlatego pomiar charakterystyki częstotliwościowej czujnika należy wykonać na certyfikowanym stanowisku, gdzie drgania czujnika są pobudzone przyśpieszeniem o określonej częstotliwości. W ten sposób wykonano pomiar charakterystyki częstotliwościowa badanego prototypu czujnika. Jej przebieg przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Eksperymentalna charakterystyka częstotliwościowa czujnika o częstotliwości rezonansowej 91Hz.

W zakresie częstotliwości wykonanych pomiarów charakterystyka częstotliwościowa prototypu czujnika jest praktycznie identyczna jak przedstawiona na rys. 10 jego teoretyczna charakterystyka częstotliwościowa.

Wnioski

W pracy przedstawiono projekt czujnika przyśpieszenia z AFP oraz wykonany prototyp do zastosowań w ITB. Projekt wykonano dla szybkości przekazywania informacji 10 bitów na sekundę. Wybrano częstotliwość własną płytki czujnika 91Hz, która jest kompromisem pomiędzy czułością czujnika, a szybkością zanikania jego odpowiedzi impulsowej. Wykonano prototyp czujnika. Zmierzone jego parametry. Uzyskano dobrą zgodność z parametrami teoretycznie obliczonymi. Pozwala to na wykonanie czujników pracujących w ITB przy innych szybkościach przekazywania informacji.

Autor: prof. dr hab. inż. Jerzy Filipiak, Politechnika Częstochowska, Instytut Optoelektroniki i Systemów Pomiarowych, E-mail: filipiak1947@gmail.com.

LITERATURA

- [1] Filipiak J., Solarz L., Steczko G., SAW Vibration Sensor, *Sensors* 11, (2011), 11809-11832.
- [2] 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.
- [3] Filipiak J., Steczko G., Kostrzewa S., Koncepcja wykorzystania czujników przyśpieszenia z akustyczną falą powierzchniową w teledystrybucji błotnej, *Przegląd Elektrotechniczny* nr 12/2015, 83-86.
- [4] Filipiak J., Kostrzewa S., Analiza parametrów czujników przyśpieszenia z AFP do zastosowania w teledystrybucji błotnej, *Przegląd Elektrotechniczny* nr 1/2017, 141-144.