

## Parametry czujników przyspieszenia z akustyczną falą powierzchniową

**Streszczenie.** Przedstawiono czujnik przyspieszenia z akustyczną falą powierzchniową. Omówiono jego zasadę działania i sposób modelowania pracy. Przedstawiono układ pomiarowy czujnika. Amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa, czułość i liniowość to podstawowe parametry czujnika. Przedstawiono sposoby pomiaru tych parametrów. Wykonano ich analizę. Otrzymane parametry porównano z parametrami aktualnie stosowanych czujników przyspieszenia.

**Abstract.** The paper presents acceleration sensor surface acoustic wave. The principle of operation and the modeling work have been discussed. Presented sensing system. Basic parameters of the sensor are: the amplitude frequency response, sensitivity, linearity. Are ways to measure these parameters. Made their analysis. The obtained parameters are compared with parameters currently used in acceleration sensors. (Acceleration sensors surface acoustic wave parameters)

**Słowa kluczowe:** akustyczne fale powierzchniowe, czujnik przyspieszenia

**Keywords:** surface acoustic waves, acceleration sensor

### Wstęp

Przyspieszenie jest wielkością wektorową, która charakteryzuje szybkość zmian wektora prędkości punktu materialnego zarówno w jego wartości liczbowej jak i kierunku. Przyspieszenie jest wektorową sumą trzech przyspieszeń: względnego, unoszenia i Coriolisa. Przyspieszenie jest podstawowym parametrem ruchu. Znajomość przyspieszenia pozwala nam na określenie właściwości ruchu ciała, a także wielkości sił działających na ciało. Ma to bardzo istotne znaczenie dla rozwoju wielu obszarów współczesnej techniki. Rola przyspieszenia w opisie ruchu podstawowych modeli ciał, a więc punktu materialnego, ciała stałego sztywnego i ciała stałego podlegającego odkształceniom sprężystym i plastycznym jest różna. Przyspieszenie jako wielkość wektorową można rozpatrywać i mierzyć w różnych układach odniesienia użytecznych do opisu problemu.

Do pomiaru przyspieszenia są stosowane różne konstrukcje mierników przyspieszenia popularnie nazywane akcelerometrami. Ich wspólną cechą jest wykorzystanie oddziaływania siły bezwładności na organ pomiarowy. Każdy organ pomiarowy pozwala na pomiar jednej składowej wektora przyspieszenia (najczęściej w układzie kartezjańskim). Każdy czujnik przyspieszenia posiada swoje parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne. Charakterystyka częstotliwościowa, czułość i liniowość to podstawowe parametry konstrukcyjne czujnika.

Aktualnie do pomiarów przyspieszenia są wykorzystywane trzy rodzaje czujników: sejsmometry, akcelerometry piezoelektryczne i mikromechaniczne krzemowe czujniki przyspieszenia (MEMS) [1, 2, 3].

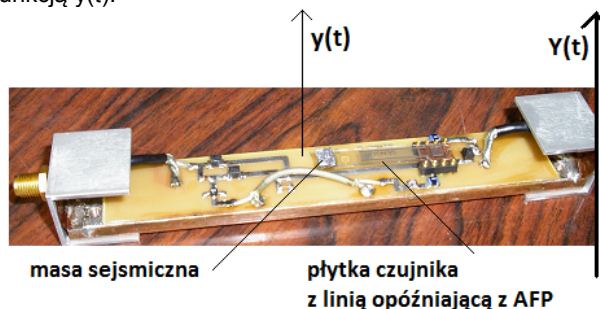
Do pomiaru przyspieszenia można wykorzystać czujnik przyspieszenia z akustyczną falą powierzchniową (CP-AFP) [4]. W pracy przedstawimy zasadę działania takiego czujnika, jego modelowanie i wykonanie oraz podstawowe parametry konstrukcyjne i sposoby ich pomiarów.

### Czujnik przyspieszenia z AFP

Na rys. 1 jest przedstawiony wykonany czujnik przyspieszenia z AFP. Urządzeniem pomiarowym czujnika jest płytka z materiału piezoelektrycznego. Na jej powierzchni jest wykonana linia opóźniająca z AFP. Jeden koniec płytki jest sztywno zamocowany. Drugi swobodny jest obciążony masą sejsmiczną.

Przemieszczenia obudowy czujnika są opisane funkcją  $Y(t)$ . Siła bezwładności proporcjonalna do przyspieszenia obudowy powoduje przemieszczenia płytki czujnika.

Powstałe naprężenia i odkształcenia zmieniają opóźnienie linii opóźniającej z AFP. Wartość zmian opóźnienia linii jest proporcjonalna do przemieszczenia końca płytki opisanego funkcją  $y(t)$ .



Rys.1. Czujnik przyspieszenia z AFP

Dla opisu parametrów ruchu anizotropowej, piezoelektrycznej płytki czujnika opracowano model o jednym stopniu swobody [5-6]. Częstotliwość rezonansowa płytki czujnika  $\omega_r$  jest opisana przez zależność:

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

gdzie:

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

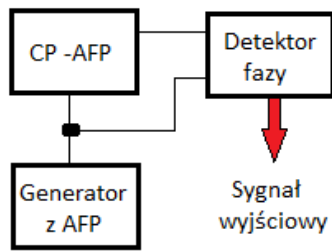
grubość płytki,  $l$  - długość płytki,  $r$  - stosunek masy sejsmicznej do masy płytki czujnika,  $E_e$  - ekwiwalentny moduł Younga,  $\tau$  - ekwiwalentny współczynnik tłumienia materiałowego

Ruch końca płytki jest opisany przez funkcję:

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

gdzie: stała  $A$  oraz  $\phi$  oblicza się z warunków początkowych.

Układ pomiarowy czujnika przyspieszenia z AFP jest przedstawiony na rys.2. Jest on złożony z generatora sygnału pomiarowego z AFP, czujnika przyspieszenia z AFP (CP-AFP) oraz detektora fazy.

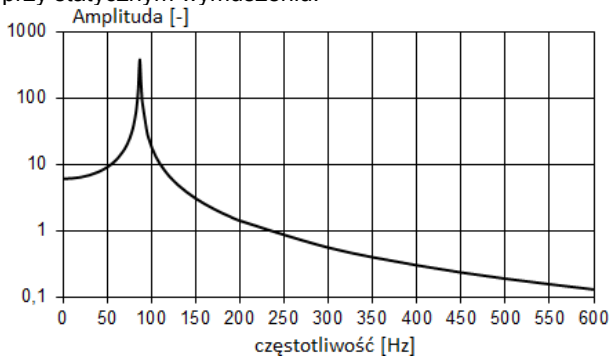


Rys. 2. Układ pomiarowy czujnika przyspieszenia z AFP

Sygnał wyjściowy z układu pomiarowego ma postać napięcia o wartości proporcjonalnej do przesunięcia fazy sygnału pomiarowego przechodzącego przez czujnik. Jest on proporcjonalny do wielkości opisanej zależnością (2). Pierwszy składnik tego wyrażenia stanowi odpowiedź impulsową układu na pobudzenie czujnika impulsem  $\delta$ -Diraca. Odpowiedź impulsowa jest związana z charakterystyką częstotliwościową układu przez transformatę Fouriera. Drugi składnik przedstawia spłot przyspieszenia i odpowiedzi impulsowej czujnika. Praktycznie sygnał ten jest proporcjonalny do przyspieszenia działającego na czujnik.

### Charakterystyka częstotliwościowa czujnika

Amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa określa zależność amplitudy sygnału wyjściowego z czujnika w funkcji zmian częstotliwości sinusoidalnego sygnału wejściowego (przyspieszenia) o stałej amplitudzie. Teoretyczną amplitudową charakterystykę częstotliwościową czujnika  $|H(\omega)|$  przedstawiono na rys. 3. Jej cechą charakterystyczną jest występowanie zjawiska rezonansu. Dla częstotliwości rezonansowej 91Hz występuje pięćdziesięciokrotny wzrost amplitudy sygnału wyjściowego z czujnika w stosunku do amplitudy sygnału przy statycznym wymuszeniu.



Rys. 3. Teoretyczna charakterystyka czujnika

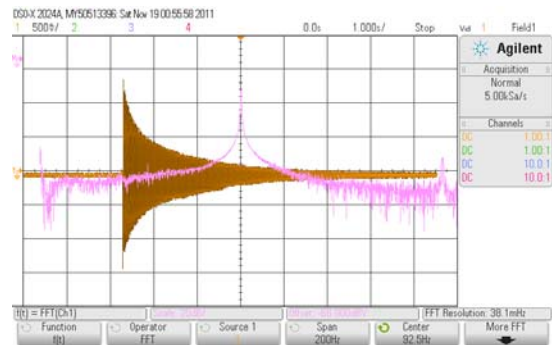
Bezpośredni, określony definicją pomiar charakterystyki częstotliwościowej czujnika wymaga jego pobudzenia przyspieszeniem o określonej częstotliwości. Stanowiska umożliwiające realizację tego typu badań są trudno dostępne, a wykonanie pomiarów jest dość kosztowne.

Zdecydowanie prostszą metodą jest rejestracja odpowiedzi impulsowej czujnika i wykonanie jej transformaty Fouriera, która jest równa charakterystyce częstotliwościowej czujnika.

Na rys. 4 przedstawiono odpowiedź impulsową czujnika drgań z AFP o częstotliwości rezonansowej 91Hz i jej widmo. Odpowiedź impulsową otrzymano przez impulsowe uderzenie obudowy czujnika. Jej widmo to amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa czujnika.

Dokładność charakterystyki wyznaczonej w ten pośredni sposób jest mniejsza niż w przypadku jej bezpośredniego pomiaru. Jest jednak wystarczająca do określenia podstawowych właściwości charakterystyki częstotliwościowej czujnika (częstotliwości rezonansowej i

wzrostu amplitudy w zakresie rezonansu). Należy zauważyć, że pomiar częstotliwości rezonansowej czujnika jest wykonany automatycznie podczas rejestracji odpowiedzi impulsowej na oscyloskopie.



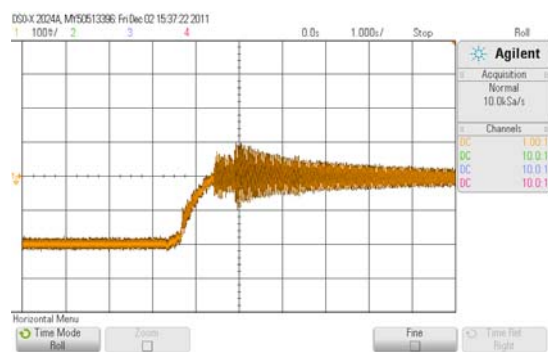
Rys. 4. Odpowiedź impulsowa czujnika (kolor żółty) i jej widmo (kolor różowy)

### Czułość czujnika

Czułość czujnika (S) jest to stosunek zmiany wartości sygnału wyjściowego z czujnika  $\Delta U_{out}$  do zmiany wartości przyspieszenia działającego na czujnik „ $\Delta g$ ”.

$$(3) \quad S(\omega) = \frac{\Delta U_{out}(\omega)}{\Delta g(\omega)}$$

Czułość czujnika zmienia się ze zmianą częstotliwości ( $\omega$ ) mierzonego przyspieszenia. Wielkość i charakter zmian zależy od amplitudowej charakterystyki częstotliwościowej czujnika. Na rys. 3 amplituda charakterystyki przy częstotliwości rezonansowej 91Hz jest 50 razy większa niż amplituda statyczna. Oznacza to, że dynamiczna czułość czujnika przy częstotliwości rezonansowej będzie 50 razy większa od czułości statycznej. Dlatego wprowadzamy pojęcie czułości dynamicznej czujnika przyspieszenia z AFP. Czujnik ma największą czułość dynamiczną dla częstotliwości rezonansowej. Jednak najczęściej wielkość czułości podaje się w statycznym trybie pracy czujnika i jest to czułość statyczna (S). Jej wyznaczenie jest proste, ponieważ łatwo jest zmienić wartość stałego przyspieszenia działającego na czujnik.



Rys. 5. Sposób wyznaczenia czułości statycznej czujnika z AFP

Czułość statyczną czujnika wyznaczono rejestrując zmianę sygnału wyjściowego z czujnika przy zmianie przyspieszenia działającego na czujnik o wartość 2"g". Przyspieszenie zmieniono przez zmianę położenia czujnika względem kierunku przyspieszenia ziemskiego. Na rys. 5 przedstawiono zmianę sygnału wyjściowego z czujnika przy zmianie przyspieszenia o „2g”. Iloraz tych wielkości to czułość statyczna czujnika. Pomiar wykonano za pomocą oscyloskopu pracującego w trybie odświeżania (roll).

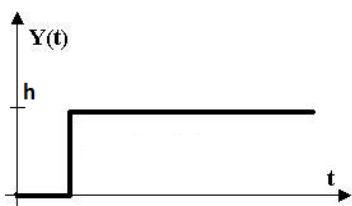
Znając czułość statyczną oraz amplitudową charakterystykę częstotliwościową czujnika jego można wyznaczyć jego czułość dynamiczną dla każdej częstotliwości, korzystając z zależności:

$$(4) \quad S(\omega) = S \frac{H(\omega)}{H(0)}$$

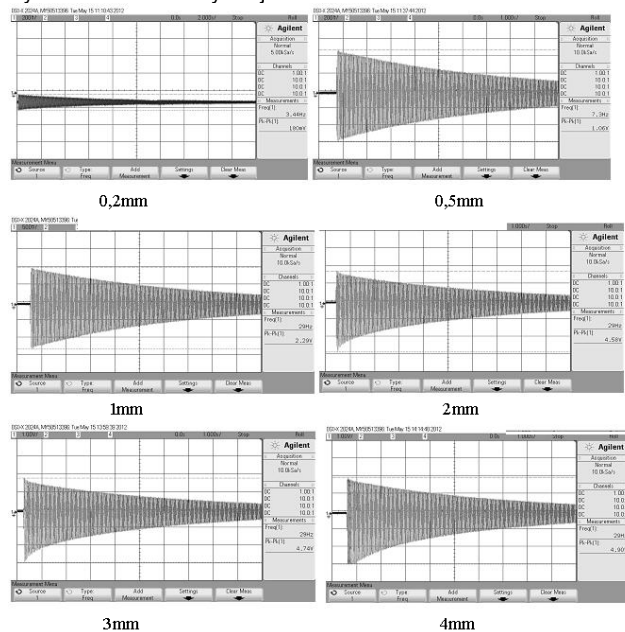
Należy zauważyć, że zależność (4) jest prawdziwa, jeśli czujnik jest liniowy.

### Liniowość czujnika

Liniowość czujnika jest określona przez funkcję zależności pomiędzy pomiarowym sygnałem wyjściowym z czujnika, a wielkością mierzonego przyspieszenia. Jeśli jest ona liniowa, to czujnik jest liniowy. Zarówno czułość jak i liniowość czujnika mogą zależeć od częstotliwości zmian przyspieszenia. Trudności z dostępnością źródeł przyspieszenia o określonej i regulowanej częstotliwości powoduje, że analiza liniowości ogranicza się do przyspieszeń stałych. Wprowadza się różne miary liniowości. Zwykle miarą jest odchylenie rzeczywistej charakterystyki czujnika przyspieszenia od prostoliniowej charakterystyki przyjętej jako znamionowa. Przedstawimy wyniki badań statycznych zależności pomiędzy pomiarowym sygnałem wyjściowym z czujnika, a wielkością mierzonego przyspieszenia. Do wykonania badań wybrano czujnik o niskiej częstotliwości rezonansowej, 29Hz. Jego odpowiedź impulsowa jest relatywnie długa (powyżej 10s). Pozwala to potwierdzić impulsowy charakter pobudzenia czujnika. Czujnik umieszczono na stoliku. Na rys. 6 przedstawiono ruch stolika o amplitudzie skoku h. Przy takim wymuszeniu sygnał wyjściowy z czujnika opisany jest przez drugi składnik przedstawiony w wyrażeniu (2). Praktycznie ma on kształt odpowiedzi impulsowej czujnika.



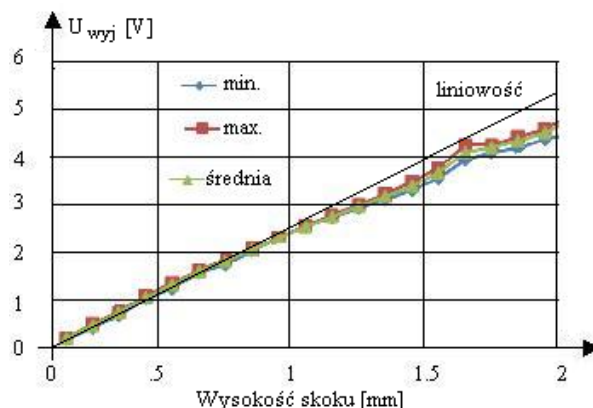
Rys. 6. Ruch obudowy czujnika w czasie



Rys. 7. Odpowiedzi impulsowe czujnika w zależności od wielkości skoku stolika.

Wykonano rejestrację odpowiedzi impulsowych czujnika dla różnych wielkości skoku jego obudowy, od 0,2mm do 4mm. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys.7.

Największe amplitudy odpowiedzi impulsowych zmieniają się od kilkunastu mV do 5V. Przy dużych amplitudach widoczne jest przesunięcie poziomu zerowego sygnału wyjściowego z czujnika. Aby wyeliminować wpływ tych deformacji na ocenę liniowości czujnika wykonano pomiary największej amplitudy od strony „dodatniej” i „ujemnej” sygnału. Wyniki tych pomiarów zależności napięcia wyjściowego z czujnika od wysokości skoku położenia jego obudowy przedstawiono na rys.8.



Rys. 8. Zależność napięcia wyjściowego z czujnika od wielkości zmian położenia jego obudowy

Nie stwierdzono wpływu przesunięcia poziomu zerowego sygnału wyjściowego z czujnika na ocenę jego liniowości. Jednak czujnik nie jest liniowy w całym zakresie pomiarowym. Można powiedzieć, że do wysokości skoku 1mm czujnik jest liniowy. Powyżej wielkości sygnału pomiarowego z czujnika rośnie wolniej ze wzrostem przyspieszenia. Prawdopodobną przyczyną tego jest charakterystyka detektora fazy. Zależność napięcia na wyjściu detektora fazy od zmian przesunięcia fazy pomiędzy sygnałem pomiarowym i odniesienia jest opisana funkcją sinus. Przesunięcie fazy przy zmianie przyspieszenia o „2g” jest rzędu 2 stopni. Przy częstotliwości rezonansowej czujnika będzie ono większe niż 30 stopni [7]. Dlatego zależność napięcia wyjściowego z czujnika w funkcji zmian przyspieszenia będzie opisana funkcją sinus, pomimo iż zmiana fazy sygnału pomiarowego jest proporcjonalna do zmian przyspieszenia działającego na czujnik.

### Wnioski

W pracy przedstawiono podstawowe parametry konstrukcyjne czujników przyspieszenia z akustyczną falą powierzchniową. Pomiary tych parametrów wykonano wykorzystując wykonane modele czujników. Ich parametry konstrukcyjne przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry czujnika

Nr czujnika	1	2	3	4	5	6
Częstotliwość rezonansowa [Hz]	29	41	55	73	91	151
Długość płytki czujnika [mm]	86	86	85	66	68	26
Wielkość masy sejsmicznej r	0,64	0,22	0	0,14	0	1
Opóźnienie linii z AFP [μs]	4,2	6,2	4,2	8,2	4,2	4,2

Czujniki zostały wykonane dla elektronicznego systemu ostrzegania [8]. Musiały mieć różną częstotliwość rezonansową. Z tego powodu konstrukcje ich organów pomiarowych były różne. Dlatego nie można porównywać ich parametrów. Częstotliwość rezonansowa wszystkich czujników była relatywnie niska. Ta właściwość pozwoliła na łatwą rejestrację wolno zanikającej odpowiedzi impulsowej czujnika. Czas ten był wystarczający do pomiaru częstotliwości rezonansowej czujnika. W obu przypadkach uzyskano wyniki zgodne z modelem teoretycznym. Poprzez transformatę Fouriera eksperymentalnej odpowiedzi impulsowej czujnika wyznaczono jego amplitudową charakterystykę częstotliwościową. Na rys. 4 przedstawiono wykonanie transformaty z wykorzystaniem oscyloskopu. Bardziej precyzyjną metodą jest wykorzystanie programu Agilent Pro VEE 9.2. W obszarze rezonansu nie ma żadnej istotnej różnicy pomiędzy tymi metodami. Ten sposób wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej nie można uznać za zadowalający w przypadkach gdy istotna jest dokładna znajomość charakterystyki w całym zakresie częstotliwości pracy czujnika. Jednak prosta metoda pozwalająca na wyznaczenie podstawowych parametrów charakterystyki w wielu przypadkach może być zupełnie wystarczająca. Wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej czujnika wymaga specjalistycznej aparatury pomiarowej. Związanych z tym problemów możemy uniknąć stosując przedstawioną metodę. Istotnym parametrem czujnika jest czułość. Jej wielkość może zmieniać się w szerokich granicach w zależności od konstrukcji czujnika. Przedstawiono prosty sposób wyznaczania czułości statycznej czujnika. Czułość statyczna jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości rezonansowej czujnika oraz wprost proporcjonalna do kwadratu częstotliwości sygnału pomiarowego (częstotliwość środkowa linii opóźniającej z AFP). Czułość statyczna zależy również od elektronicznego układu pomiarowego czujnika. Dlatego dla każdego modelu wartość czułości statycznej i dynamicznej była inna. Przykładowo dla czujnika nr 1 o częstotliwości

rezonansowej 29Hz wynosiła 2V/g. Czujników przyśpieszenia z AFP nie ma w aktualnej ofercie rynkowej. Jednak w stosunku do aktualnie stosowanych czujników przyśpieszenia posiadają one konkurencyjne parametry. Zaliczamy do nich: pomiar stałych przyśpieszeń, możliwość otrzymania niskich częstotliwości rezonansowych i wysokich czułości, prostą konstrukcję oraz możliwość pracy bezprzewodowej.

#### LITERATURA

- [1] Bruel and Kjaer, *Piezoelectric Accelerometer and vibration Preamplifier Handbook*. Bruel and Kjaer, Naerum.Danmark (1978)
- [2] Lee, I., Yoon G. H., Park J., Seok S., Chun K., Lee, K., Development and analysis of the vertical capacitive accelerometer, *Sensors and Actuators A 119* (2005), 8-18
- [3] Dane techniczne czujników drgań firm: ([www.sensonics.co.uk](http://www.sensonics.co.uk), [www.metrozet.com](http://www.metrozet.com), [www.hansfordsensors.pl](http://www.hansfordsensors.pl), [www.reftek.com](http://www.reftek.com), [www.EQMet.com](http://www.EQMet.com), [www.metrxvibration.com](http://www.metrxvibration.com))
- [4] Filipiak J., Czujniki przyśpieszenia z akustyczną falą powierzchniową, *Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej*, (2006), nr 121, 1-198
- [5] Filipiak J., Solarz L., Steczko G., SAW Vibration Sensor, *Sensors 11*, (2011), 11809-11832.
- [6] Filipiak J., Steczko G., Seismic vibration sensor with acoustic surface wave, rozdział w książce "Acoustic Waves" pod redakcją Marco G. Beghi, (2013), ISBN 979-953-307-802-0
- [7] Filipiak J., Solarz, L., Steczko G., SAW delay line for vibration sensors, *Acta Physica Polonica A* vol. 120, (2012), 598-603
- [8] Filipiak J., Solarz L., Steczko G., Analiza pracy systemu elektronicznego ostrzegania z czujnikami drgań z AFP, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11a, 177-179, (2010)

**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](mailto:filipiak1947@gmail.com), Grzegorz Steczko, E-mail: [gem@gemsc.com.pl](mailto:gem@gemsc.com.pl), Sebastian Kostrzewa, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroniki i Systemów Sterowania, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: [gitarzystalnb@gmail.com](mailto:gitarzystalnb@gmail.com), Łukasz Wcisło, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroniki i Systemów Sterowania, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: [broda\\_87@o2.pl](mailto:broda_87@o2.pl)