

Podzespoły z akustyczną falą powierzchniową

Streszczenie. W pracy przedstawiono podzespoły z akustyczną falą powierzchniową. Omówiono ich historyczny rozwój od wynalazku przetwornika międzypalczastego przez pierwsze zastosowania do obróbki sygnałów złożonych w systemach radiolokacyjnych i do wprowadzenia filtrów AFP dla telefonii komórkowej. Przedstawiono praktycznie wykonane podzespoły z AFP znane z literatury oraz z prac Autorów.

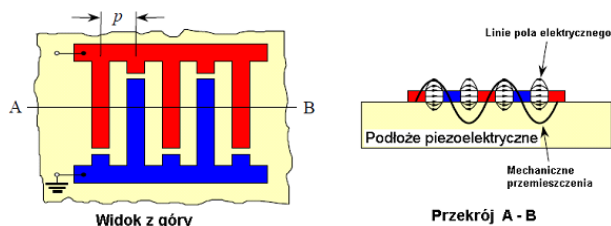
Abstract. The paper presents components of surface acoustic wave devices. Will discuss the historical development of the components of the AFP since invention the interdigital transducer the first use of complex signal processing in radar systems for the introduction of filters AFP for miniaturization of mobile telephony. The components are practically made of AFP familiar with the literature and the work of the Authors. (**surface acoustic wave devices**)

Słowa kluczowe: urządzenia z akustyczną falą powierzchniową

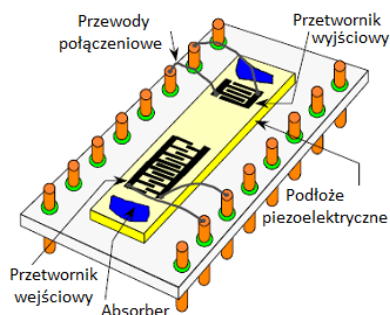
Keywords: surface acoustic wave devices

Wstęp

Fala powierzchniowa rozprzestrzenia się w pobliżu powierzchni swobodnej ciała stałego i zanika w jego głębi. Głębokość wnikania fali zależy od rodzaju ośrodka, częstotliwości fali, a także typu fali. Zwykle głębokość zanikania odpowiada długości fali powierzchniowej. W ośrodkach izotropowych rozróżniamy dwa typy fal powierzchniowych. Pierwszy to fala Rayleigha. Jej opis matematyczny został opracowany w 1885 r. Drugi to fala Love'a, której opis matematyczny został opracowany w 1911 r. W przypadku fali Rayleigha ruch cząstek odbywa się po elipsie, której płaszczyzna jest wyznaczona przez kierunek propagacji fali i kierunek prostopadły do powierzchni swobodnej ciała stałego. W przypadku fali Love'a, ruch cząstek odbywa się prostopadle do kierunku propagacji i równoległe do powierzchni swobodnej ciała stałego. Tego typu fale powierzchniowe towarzyszą trzęsieniom ziemi. W ośrodkach anizotropowych struktura i właściwości fal powierzchniowych zależą od rodzaju anizotropii i kierunku rozprzestrzeniania się fal. Przełomem w technicznym wykorzystaniu fal powierzchniowych było opracowanie przetwornika międzypalczastego (rys.1) przez White'a i Voltmera w 1965 r. Umożliwił on wzbudzenie fal powierzchniowych w podłożach piezoelektrycznych i ich zamianę na sygnał elektryczny.



Rys. 1. Przetwornik międzypalczasty



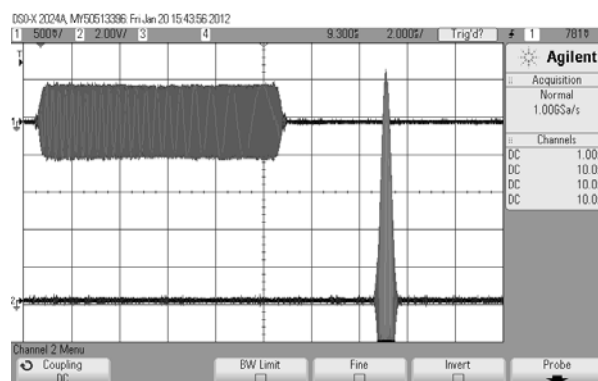
Rys. 2. Filtr z falą powierzchniową złożony z dwóch współpracujących przetworników międzypalczastych

Dwa współpracujące przetworniki tworzą elektryczny filtr bierny (rys.2) [1, 2]. Zakres pracy tych filtrów obejmuje częstotliwości od kilkudziesięciu MHz do kilku GHz. Do pełnego opisu parametrów filtra konieczna jest znajomość: jego charakterystyki częstotliwościowej H oraz admitancji wejścia Y_N i wyjścia Y_0 . Filtr współpracuje z układami elektronicznymi o impedancjach R_g oraz R_0 . Charakterystykę częstotliwościową możemy obliczyć z zależności :

$$(1) \quad H = \frac{Y_w R_0}{(1 + Y_N R_g)(1 + Y_0 R_0)}$$

gdzie: admitancję wzajemną Y_w oraz Y_N i Y_0 obliczamy za pomocą istniejących modeli przetworników.

Admitancja wzajemna Y_w zależy od geometrii przetworników międzypalczastych oraz parametrów podłoża piezoelektrycznego. Projektując geometrię przetworników można wykonać filtry o dość dowolnej częstotliwościowej charakterystyce amplitudowej oraz liniowej, bądź nieliniowej charakterystyce fazowej. Podłoża piezoelektryczne mają powtarzalne parametry. Technologia wykonania filtrów z AFP jest oparta na klasycznej fotolitografii. Czynniki te zapewniają powtarzalność wykonania filtrów z AFP, co spowodowało rozwój podzespołów z AFP i ich szerokie zastosowanie.



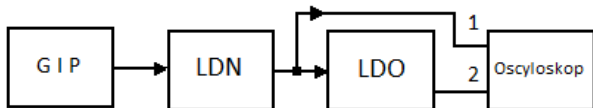
Rys. 3. Sygnał z l. m. cz. (12μs) i sygnał po kompresji (0,4μs)

Podzespoły z AFP do systemów radiolokacyjnych

Największą wykrywalność i rozróżnialność systemu radiolokacyjnego zapewnia stosowanie długiego sygnału nadawczego i jego kompresja w odbiorniku. Można to realizować przez wykorzystanie sygnałów złożonych. Pierwsze podzespoły z AFP zostały opracowane dla obróbki tego typu sygnałów złożonych [3]. Przykładem są linie dyspersyjne służące do generacji sygnału nadawczego z liniową modulacją częstotliwości (l.m.cz.) i jego kompresji.

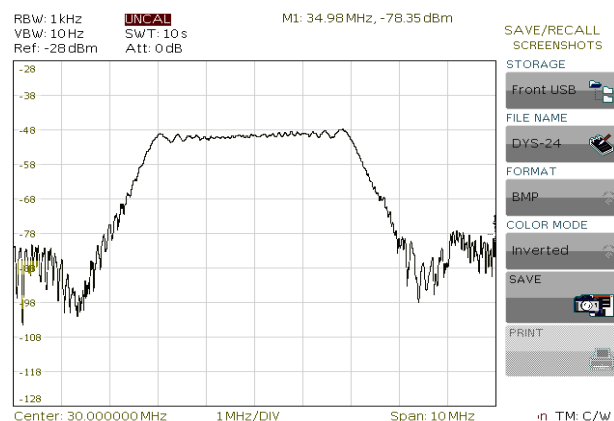
Na rys. 3 przedstawiono sygnał z l. m.cz. o długości 12 μ s, częstotliwości środkowej 29,9MHz oraz sygnał po kompresji o długości 0,4 μ s. Uzyskano poziom listów bocznych w tym sygnale niższy niż -40dB [4].

Sygnaly te zarejestrowano w układzie, którego schemat blokowy jest przedstawiony na rys. 4. Sygnał nadawczy jest odpowiednią impulsową linią dyspersyjną nadawczej (LDN). Otrzymał go przez pobudzenie LDN sygnałem w postaci impulsu z generatora impulsów prostokątnych (GIP) (kanał 1 oscyloskopu). Sygnał po kompresji otrzymano przez podanie sygnału nadawczego na linię dyspersyjną odbiorczą (LDO) (kanał 2 oscyloskopu).



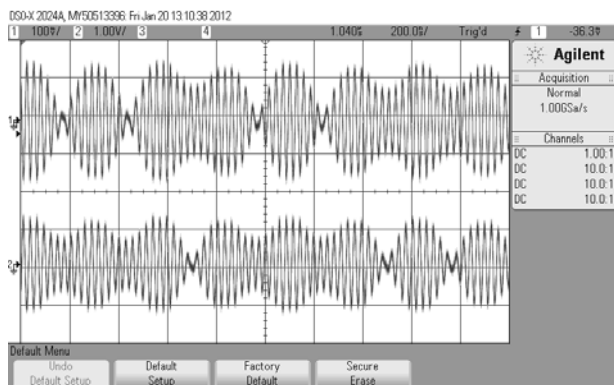
Rys. 4. Układ do rejestracji odpowiedzi impulsowej i sygnału po kompresji

Amplitudę charakterystyki częstotliwościowej LDN przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa LDN.

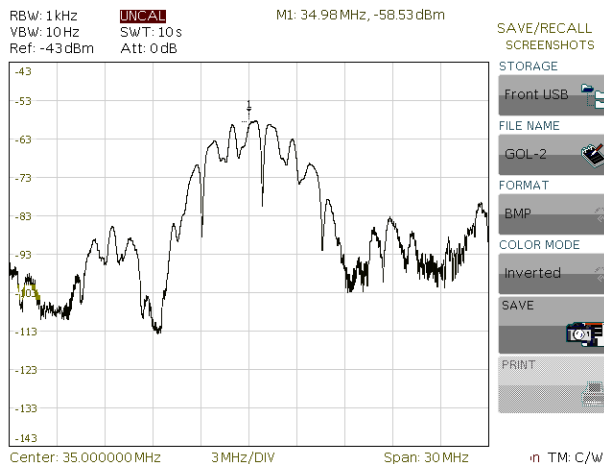
Ma ona kształt zbliżony do prostokąta. Widmo sygnału nadawczego z l.m.cz. jest równe charakterystyce częstotliwościowej LDN. Pasma widma wynosi 4,85MHz. Skupiony kształt amplitudy widma sygnału z l.m.cz. pozwala na ograniczenie pasma pracy układów elektronicznych współpracujących z liniami, co ułatwia konstrukcję systemu radiolokacyjnego. Prezentowane linie były stosowane w polskich systemach radiolokacyjnych w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Linie wykonano w postaci dwóch współpracujących przetworników międzypalczastych.



Rys. 6. Para ośmiobitowych kodów komplementarnych.
 Sygnał górny o kodzie [1, -1, 1, 1, -1, 1, 1, 1].
 Sygnał dolny o kodzie [1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, -1].

Innymi rodzajami sygnałów złożonych są sygnały kodowane fazowo. Na rys. 6 przedstawiono dwa sygnały tworzące ośmiobitową parę kodów komplementarnych Goolay'a. Kodowanie polega na zmianie fazy pomiędzy sekcjami sygnału o 180 stopni. Na oscylogramie zmiana fazy jest widoczna w miejscach gdzie amplituda sygnału jest zbliżona do zera.

Do generacji tych sygnałów wykorzystano odpowiedzi impulsowe filtrów z AFP [5]. Za pomocą filtrów dopasowanych wykonano ich kompresję. Sygnały po kompresji posiadały listki boczne. Ich suma ma tylko listek główny. Listki boczne wzajemnie się kompensują. Amplituda widma jednego z sygnałów jest przedstawiona na rys. 7. Podobnie jak w przypadku linii dyspersyjnych otrzymano ją przez pomiar charakterystyki częstotliwościowej filtru.



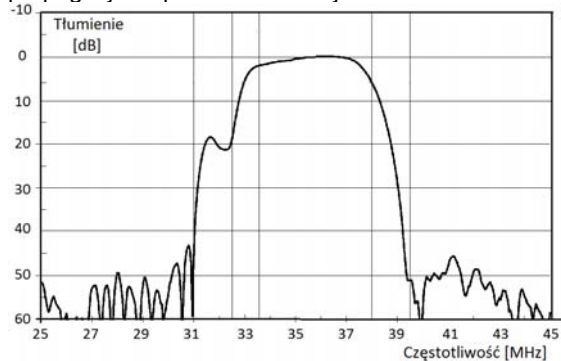
Rys. 7. Amplituda widma ośmiobitowego sygnału Goolay'a.

Widmo to w porównaniu do widma sygnału z l.m.cz. jest szerokie. Ta właściwość sygnałów kodowanych fazowo jest jednym z ważniejszych powodów utrudniających ich wykorzystanie w systemach radiolokacyjnych.

Filtry pasmowe

Równocześnie z pracami nad podzespołami z AFP do systemów radiolokacyjnych realizowano prace nad filtrami pasmowymi o liniowej charakterystyce fazowej [1, 6, 7]. Natychmiast wykorzystano je w wojskowych i cywilnych systemach telekomunikacyjnych. Praca na wysokich częstotliwościach, powtarzalność wykonania, miniaturyzacja, brak strojenia i niski koszt wykonania to powody, że zastąpiły one filtry LC we wszystkich wymienionych obszarach. Dostępność fali powierzchniowej w całym obszarze jej propagacji, wykorzystanie zjawisk związanych z odbiciem, regeneracją fali i jej prowadzeniem w falowodzie stwarza możliwość różnej konstrukcji filtrów z AFP. Wymienione elementy konstrukcyjne oraz wykorzystanie piezoelektrycznych podłoży o różnych parametrach (kwarc, niobian litu, tantalit litu) umożliwiają wykonanie filtrów z AFP o szerokim zakresie parametrów użytkowych. Pasma przepustowe filtrów z AFP może zmieniać się od 10⁻⁵ do połowy wartości ich częstotliwości środkowej. Straty w paśmie przepustowym zmieniają się od kilku dB do kilkunastu dB. Tłumienie w paśmie zaporowym jest rzędu 50dB wyższe niż w paśmie przepustowym. Można powiedzieć, że istnieje możliwość wykonania filtrów z AFP o dość dowolnej częstotliwościowej charakterystyce amplitudowej oraz liniowej, bądź nieliniowej charakterystyce fazowej. Przykładem powszechnego wykorzystania filtrów z AFP był filtr pośredniej częstotliwości do odbiorników analogowej telewizji kolorowej. Filtr tego typu opracowany

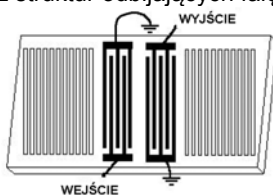
w 1985 r. zastąpił filtry LC i wchodził w skład każdego odbiornika TV. Na rys. 8 przedstawiono amplitudową charakterystykę częstotliwościową toru wizji i fonii odbiornika TV Siemens Matsuhita Components z filtrem K6277K. Filtr został wykonany w postaci dwóch współpracujących przetworników międzypalczastych umieszczonych w dwóch torach. Pomiędzy nimi umieszczono sprzęgacz kierunkowy, którego zadaniem była eliminacja szkodliwych fal objętościowych wzbudzanych przez jeden z przetworników przez przesunięcie toru propagacji fali powierzchniowej.



Rys. 8. Charakterystyka częstotliwościowa toru wizji i fonii odbiornika TV Siemens Matsuhita Components z filtrem K6277K

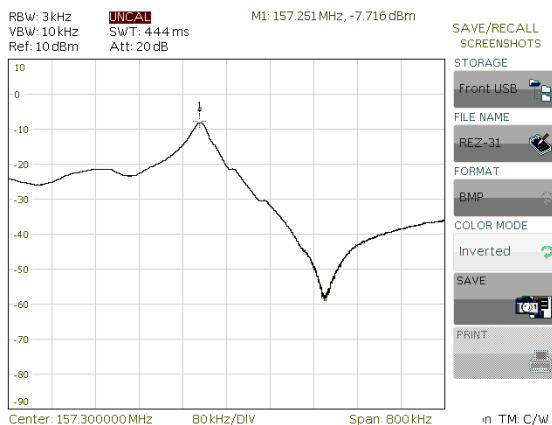
Tego typu filtr jest aktualnie w ofercie Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie.

Rezonatory są przykładem wąskopasmowych szeroko stosowanych podzespołów z AFP. Przykładową strukturę rezonatora przedstawiono na rys. 9. Jest ona złożona z dwóch przetworników międzypalczastych umieszczonych wewnątrz struktur odbijających falę powierzchniową.



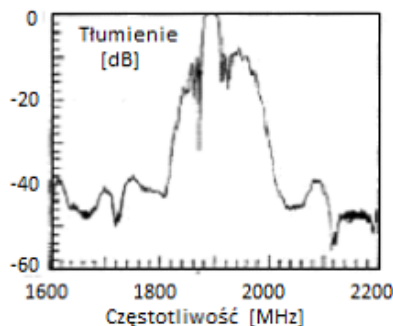
Rys. 9. Struktura rezonatora z AFP

Częstotliwość rezonansowa wynosiła 157,25MHz, a straty 7,7dB. Dobroć rezonatora jest rzędu 10^3 . Rezonatory tego typu wykonuje się do zakresu częstotliwości kilku GHz. Na rys.10 przedstawiono amplitudową charakterystykę częstotliwościową rezonatora wykonanego dla czujników z AFP [8].



Rys. 10. Charakterystyka częstotliwościowa rezonatora z AFP

Na uwagę zasługują filtry z AFP opracowane dla telefonii komórkowej w 1990 roku (rys. 11). Ich konstrukcja jest oparta na jednokierunkowych, jednofazowych przetwornikach międzypalczastych (SPUDT) [9]. Przyczyniły się do miniaturyzacji telefonów komórkowych. Te wąskopasmowe, o niskich stratach (poniżej 2dB) filtry, pracujące w pasmach telefonii komórkowej są wykorzystywane do chwili obecnej.

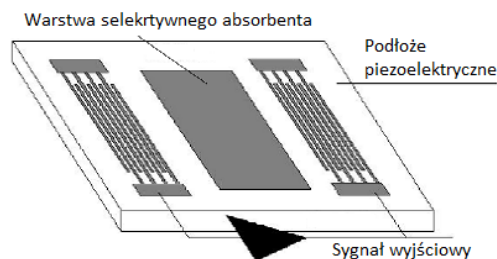


Rys.11. Charakterystyka filtra do telefonii komórkowej i jego wykonanie w technice montażu powierzchniowego

Tego typu miniaturowe filtry z AFP są wykorzystywane w urządzeniach elektronicznych, które pracują w ogólnodostępnych pasmach 433MHz oraz 865MHz.

Czujniki z AFP

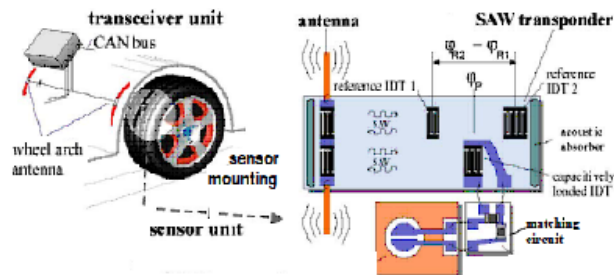
Prędkość fali powierzchniowej w piezoelektrycznych podłożach jest 10^5 razy mniejsza od prędkości światła. Dlatego każdy z filtr z AFP jest linią opóźniającą. Wielkość opóźnienia linii zależy od prędkości fali powierzchniowej oraz jej drogi propagacji. Zmiana różnych wielkości fizycznych (np. temperatury) działających na linię może zmieniać wielkość jej opóźnienia. Oddziaływanie to umożliwia wykonanie czujników różnych wielkości fizycznych. Zasada ich działania polega na pomiarze zmian opóźnienia fali powierzchniowej spowodowanej oddziaływaniem mierzonej wielkości fizycznej na linię. Względne zmiany opóźnienia linii są małe (rzędu 10^{-5}), co wymaga opracowania sposobów ich pomiaru. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest wykonanie generatora przez umieszczenie linii w pętli sprzężenia zwrotnego wzmacniacza. Zmiana opóźnienia linii zmienia częstotliwość generatora. Generator pracuje na wysokiej częstotliwości (np. kilkaset MHz). Stosunkowo niewielkie względne zmiany opóźnienia linii powodują mierzalne zmiany częstotliwości generatora. Przykładem takiego rozwiązania jest struktura czujnika stężenia gazów z AFP przedstawiona na rys. 12.



Rys.12. Struktura filtra z AFP do pomiaru stężenia gazu

Warstwa selektywnego absorbenta jest umieszczona pomiędzy przetwornikami tworzącymi linię. Absorbowany gaz zmienia właściwości warstwy (np. sztywność, ciężar), co prowadzi do zmiany opóźnienia linii. Pomiar zmian częstotliwości generatora pozwala na określenie zmian stężenia gazu. Do pomiaru zmian opóźnienia linii z AFP

wykorzystuje się też detektory fazy oraz kwadraturowe demodulatory fazy. Czujniki z AFP są stosowane do pomiaru: stężenia gazów [10], temperatury, ciśnienia [11] oraz wielkości mechanicznych: momentu (siły) w obrotach wału, naprężeń mechanicznych, przyspieszeń [12] i drgań [13]. Praca czujników z AFP na wysokich częstotliwościach ułatwia ich wykonanie w wersji bezprzewodowej. Z tej grupy czujników szerokie zastosowanie znalazły czujniki pasywne (bierne) z AFP. Przykładem są układy monitorowania ciśnienia w oponach samochodowych. Na rys.13 przedstawiono tego typu układ opracowany przez firmę Siemens [14].



Rys.13. Bezprzewodowy układ monitorowania ciśnienia w kołach samochodu opracowany przez firmę Siemens.

W kole pojazdu umieszczony jest bezprzewodowy czujnik bierny (SAW transponder) oraz kondensator którego pojemność zależy od wielkości ciśnienia w kole. Kondensator stanowi obciążenie reflektora czujnika w postaci przetwornika międzypalczystego. Wielkość odbicia fali od reflektora zależy od wielkości pojemności. Odpowiedź czujnika na sygnał zapytania zależy od ciśnienia w kołach. System pracuje na częstotliwości 2,45GHz i jest powszechnie stosowany. Pasywne czujniki z AFP o podobnej konstrukcji są stosowane do monitorowania temperatury układów hamulcowych oraz izolatorów sieci energetycznych.

Wnioski

W pracy przedstawiono wybrane podzespoły z AFP, które są wszechstronnymi i skutecznymi narzędziami do przetwarzania sygnałów elektrycznych w szerokim zakresie funkcji jak opóźnienie, filtracja, obróbka sygnałów złożonych. Ich technologia otworzyła im drogę do masowych produktów rynkowych, takich jak odbiorniki telewizyjne, pagery, telefony komórkowe, gdzie wielkość produkcji to miliony urządzeń. Na drugim końcu skali produkcji znajdują się specjalistyczne urządzenia o

wysokich parametrach przetwarzania sygnału do komunikacji satelitarnej i zastosowań wojskowych, takich jak radar i urządzenia do wojny elektronicznej.

LITERATURA

- [1] Morgan D., P., *A History of SAW Devices*, Advances in SAW Technology, Systems and Applications, vol.1, (2000), ISBN 978-98102-441-49.
- [2] Matthews H., *Surface wave filters*, (1977), J.Wiley & Sons Inc., ISBN 978-047-15-8030-00
- [3] W.R.Smith W. R., Gerard H. M., Reeder T. M. and Shaw H. J., *Design of surface wave delay lines with interdigital transducers*. IEEE Trans. MTT-17, (1969), 856-873.
- [4] Danicki E., Filipiak J., Kawalec A., *SAW dispersive delay line utilising apodised IDT with periodic electrodes*, Electronics Letters, 22, 19, (1986).
- [5] Danicki E., Filipiak J., *Realizacja kodów komplementarnych na akustycznych falach powierzchniowych*, Biul. WAT 23, 1, 53-56, (1974).
- [6] Tancrell H., Holland M. G., *Acoustic surface wave filters*, Proc. IEEE, 59, 3 (1971), 393-399.
- [7] Hartmann C.S., Bell D.T., Rosenfeld R.C., *Impulse model design of acoustic surface wave filters*, IEEE Trans. MTT-21, 4, (1973), 162-175.
- [8] Marć P., Filipiak J., *Application of equivalent-network model to analysis and synthesis of the SAW resonators*, Molecular and Quantum Acoustic 23, (2002), 293-298.
- [9] Plesky V., Koskela J., *Coupling-of-Modes Analysis of SAW Devices*, Advances in SAW Technology, Systems and Applications, vol. 2, (2000).
- [10] Wohltjen H., Dessy R., *Surface Acoustic Waves Probe for Chemical Analysis I*. Introduction and Instrument Design. Analytical Chemistry. j. 9: 1458-1475, (1979).
- [11] Cullen C., Montress T. *Progress in the Development of SAW Resonator Pressure Transducers*. Proc. Ultrasonics Symposium. j. 2: 696-701, (1980).
- [12] Seifert F., Bulst W., Ruppel C., *Mechanical sensor based on surface acoustic waves*. Sensors and Actuator A. j. 44: 231-239, (1994).
- [13] Filipiak J., Solarz L., Steczko G., *SAW Vibration Sensor*, Sensors 11, (2011), 11809-11832.
- [14] Pohl A, Ostermayer G, Reindl L, Seifert F., *Monitoring the Tire Pressure of Cars Using Passive SAW Sensors*. Proc. Ultrasonics Symposium.j.1: 471-474, (1997).

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, 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, Łukasz Wcisło, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroniki i Systemów Sterowania, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: broda_87@o2.pl