

# APARATURA

## BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

### Stanowisko do badania sensorów z akustyczną falą powierzchniową

MICHAŁ GRABKA<sup>1</sup>, KRZYSZTOF JASEK<sup>1</sup>, MATEUSZ PASTERNAK<sup>2</sup>, WITOLD MILUSKI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, WYDZIAŁ NOWYCH TECHNOLOGII I CHEMII

<sup>2</sup> WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

<sup>3</sup> WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, WYDZIAŁ MECHATRONIKI I LOTNICTWA

**Słowa kluczowe:** sensory z akustyczną falą powierzchniową (AFP), akustoelektroniczne układy pomiarowe

#### STRESZCZENIE

Układy elektroniczne współpracujące z sensorami z AFP mają najczęściej postać oscylatora, którego zmiany częstotliwości rezonansowej odzwierciedlają zmiany prędkości propagacji AFP. Pomiar samych zmian częstotliwości rezonansowej utrudnia lub nawet uniemożliwia wydobywanie istotnych informacji o mechanizmach oddziaływania warstwy sensorowej z otoczeniem. W pracy przedstawiono zaprojektowane i wykonane w Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) stanowisko do badania sensorów z AFP, w którym klasyczny układ oscylatora został zastąpiony systemem liniowym z wymuszeniem zewnętrznym, generowanym przez stabilny generator sygnału ze schodkową modulacją częstotliwości. Obok pomiaru częstotliwości rezonansowej, układ umożliwia pomiary tłumienia i fazy AFP, co pozwala na pełniejsze wykorzystanie możliwości detekcyjnych sensorów. W pracy przedstawiono zasadę działania, opis konstrukcji stanowiska z prototypową matrycą czujników z AFP oraz opis oprogramowania sterującego.

# A system for SAW sensors research

**Keywords:** surface acoustic wave (SAW) sensors, SAW sensors measurement circuits

## ABSTRACT

An electronic circuits collaborating with SAW sensors have usually a self-oscillator architecture where resonant frequency changes reflect the SAW velocity changes. Unfortunately the measurements including the resonant frequency only make the substantial information concerning interaction mechanism between sensor layer and ambient gases hard or even impossible to extract.

In the paper a prototype laboratory test stand for SAW sensors designed and manufactured in Military University of Technology is described. In the system typical self-oscillating circuits with SAW device working inside positive feedback loop was replaced by the linear system with stepped frequency source. The system allows the measurements of signal amplitude and phase shift besides frequency changes. It gives a possibility of more complete insight into the SAW-ambient gas interaction mechanism. In the paper operating principle of the system as well as control software for test stand with SAW matrix are described.

## 1. WSTĘP

Układy akustoelektroniczne, działające w oparciu o zjawiska towarzyszące propagacji akustycznych fal powierzchniowych (AFP lub ang. SAW – *surface acoustic wave*), znane są m.in. ze swej wysokiej czułości na różnorakie czynniki zewnętrzne. Tę ich właściwość wykorzystuje się do konstrukcji sensorów wielkości nieelektrycznych, począwszy od różnych układów detekcji parametrów mechanicznych określonych obiektów, a skończywszy na wykrywaniu obecności wybranych związków chemicznych.

Należy tu zaznaczyć, że pod pojęciem AFP kryje się cała gama różnorodnych fal propagujących się w obrębie warstwy przypowierzchniowej ciał stałych lub też na styku powierzchni ciał stałych z innymi ośrodkami. Do typów fal najczęściej wykorzystywanych technicznie zaliczyć można fale Rayleigha, Love'a, Lamba, a także różne typy módów poprzecznych. Każda z tych fal charakteryzuje się specyficznymi cechami wykazując swoistą czułość na różne parametry otoczenia [1]. We wszystkich jednak przypadkach informacja o zmianach w otoczeniu przejawia się w zmianie prędkości, okresu lub amplitudy AFP.

Systemy elektroniczne współpracujące z sensorami z AFP mierzą zwykle tylko zmiany prędkości AFP, poprzez pomiar częstotliwości rezonansowej układu oscylacyjnego [2-5]. Układ taki umożliwia osiągnięcie wysokiej rozdzielczości częstotliwościowej, ale jest bardzo wrażliwy na zmiany tłumienności sensora, które mogą wygasić jego

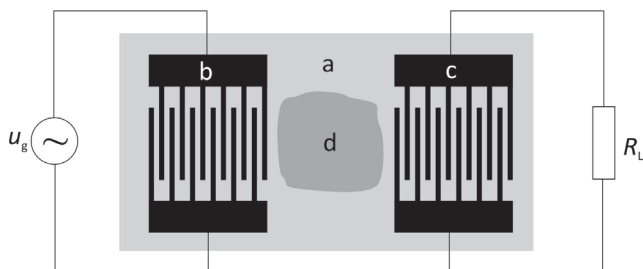
oscylacje lub spowodować przeskok na inną częstotliwość rezonansową. Powoduje to konieczność strojenia układu, które trzeba powtarzać każdorazowo po zmianie urządzenia z AFP, a często także w trakcie pomiaru, jeżeli spowodowana oddziaływaniem zewnętrznym zmiana częstotliwości bądź tłumienia jest zbyt duża. Istotniejsze jest jednak to, że pomiar wyłącznie zmian częstotliwości sensorów z AFP utrudnia bądź też nie pozwala na wydobycie wielu bardzo istotnych informacji dotyczących mechanizmów oddziaływania warstwy sensorowej z otoczeniem. W literaturze można znaleźć szereg przykładów demonstrujących, że tłumieniu AFP nie musi towarzyszyć zmiana prędkości fali lub zmiana ta jest niewielka. Tak się dzieje m.in. przy zmianie masy molowej gazu otaczającego sensor [6]. Ponadto można zaobserwować wpływ fazy oscylującego układu na czułość częstotliwościową sensora [3]. Dlatego, obok pomiaru częstotliwości rezonansowej, bardzo ważne są też pomiary tłumienia i fazy AFP, co pozwala na lepsze wykorzystanie możliwości detekcyjnych tego typu sensorów. Pomiary takie wykonywane są najczęściej woltomierzem wektorowym lub analizatorem sieci [7, 8]. Prostsze układy pomiarowe zwykle nie zapewniają wymaganej dokładności i powtarzalności. Rozwój elektroniki cyfrowej umożliwił jednak konstruowanie dedykowanych systemów, służących do precyzyjnego pomiaru większej liczby parametrów urządzeń z AFP. W prezentowanej pracy przedstawiono zaprojektowane i wykonane w Wojskowej Akademii Technicznej stanowisko do badania

sensorów z AFP, w którym klasyczny układ oscylatora został zastąpiony systemem z wymuszeniem zewnętrznym. W systemie tym na wejście sensora podawany jest sygnał ze schodkową modulacją częstotliwości, zaś sygnał wyjściowy zostaje zmierzony przy zastosowaniu odbioru kwadraturowego. Zastosowanie stabilnego źródła oraz cyfrowej syntezy sygnału sondującego pozwala na pomiar częstotliwości w szerokim paśmie z rozdzielczością około 1 Hz. Cyfrowe przetwarzanie sygnału, realizowane w układzie FPGA, pozwala także wyznaczać tłumienie oraz fazę sygnału.

System elektroniczny został przystosowany do pomiaru parametrów w ośmiu niezależnych kanałach. Pozwala to na jednoczesną realizację kilku badań oraz zastosowanie metod rozpoznawania wzorców opartych o sieci neuronowe i inne techniki chemometryczne. Stanowisko zostało dodatkowo wyposażone w sterowany komputerowo system wytwarzania mieszanin gazowych oraz wilgoci, co umożliwi automatyczne pomiary charakterystyk stężeniowych badanych czujników.

## 2. ZASADA DZIAŁANIA SENSORÓW Z AKUSTYCZNĄ FAŁĄ POWIERZCHNIOWĄ

Sensory z akustyczną falą powierzchniową zbudowane są z piezoelektrycznego podłoża z naniesionymi przetwornikami międzypalczastymi, jak przedstawiono na Rysunku 1.



**Rysunek 1** Najprostsza konfiguracja sensora z akustyczną falą powierzchniową: a – podłoże piezoelektryczne, b – przetwornik nadawczy, c – przetwornik odbiorczy, d – warstwa sensorowa

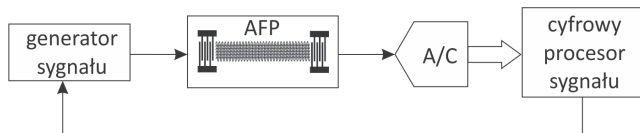
W tym celu najczęściej stosowane są podłoża piezoelektryczne o wysokim współczynniku sprzężenia elektromechanicznego (np.  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ ) oraz  $\text{SiO}_2$ , charakteryzujący się niską wartością tego współczynnika, ale jednocześnie dobrą stabilnością temperaturową. Przetworniki międzypalczaste wykonane są zwykle z aluminium lub złota. Jeden z nich stanowi nadajnik, a drugi odbiornik fali akustycznej. AFP zostaje wytworzona w wyniku odwrotnego efektu piezo-

elektrycznego w warstwie przypowierzchniowej podłoża, po przyłożeniu zmiennego napięcia do przetwornika nadawczego. Napięcie to generuje odpowiadające geometrii elektrod deformacje mechaniczne, które propagują się po powierzchni podłoża w postaci AFP. Prędkość niezaburzonej fali akustycznej jest dla danego podłoża i kierunku propagacji fali stała, co oznacza, że przetworniki międzypalczaste mają określoną częstotliwość rezonansową. W najprostszym przypadku odległość między elektrodami oraz ich szerokość wynoszą  $\lambda/4$ , gdzie  $\lambda$  jest długością fali AFP. Zakres częstotliwości przetwarzanych przez przetworniki jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalny do liczby par palców, zaś generowana przez przetwornik nadawczy fala akustyczna propaguje się w dwóch przeciwnych kierunkach. Użyteczna jest tylko fala propagująca się w kierunku przetwornika odbiorczego, gdzie przy wykorzystaniu prostego efektu piezoelektrycznego zostaje ona zamieniona na zmienne napięcie (fala propagująca się w kierunku przeciwnym jest w takim układzie celowo wytłumiana).

AFP charakteryzują się wysoką wrażliwością na zmienność parametrów otoczenia, co przejawia się przede wszystkim w zmianie ich prędkości oraz tłumienia. Jeżeli w obszarze propagacji umieszczona zostanie substancja, która zmienia swoje parametry elektryczne lub mechaniczne pod wpływem zaabsorbowanych z powietrza par lub gazów (warstwa sensorowa), to taki układ staje się sensorem chemicznym. Istnieje kilka mechanizmów odpowiedzialnych za zmianę parametrów propagacji AFP. Najważniejsze z nich to obciążenie masowe podłoża, zmiana stałych sprężystości warstwy sensorowej lub też jej impedancji elektrycznej. Prędkość fali zmienia się w wyniku zaburzenia parametrów mechanicznych lub elektrycznych toru propagacji AFP, z kolei zmiany amplitudy wynikają z rozpraszania energii w całym układzie. Obejmuje ono straty związane z przetwarzaniem sygnału elektrycznego na falę akustyczną i ponownie na sygnał elektryczny, straty propagacji, a także straty związane z niedopasowaniem energetycznym oraz wyciekaniem energii do objętości podłoża lub do otoczenia. Modele matematyczne opisujące zależność parametrów fali akustycznej od wymienionych czynników są dość złożone i zwykle zawierają szereg uproszczeń [9-10], dlatego konstrukcja nowych czujników opiera się przede wszystkim na badaniach eksperymentalnych.

### 3. UKŁAD ELEKTRONICZNY SENSORÓW Z AFP

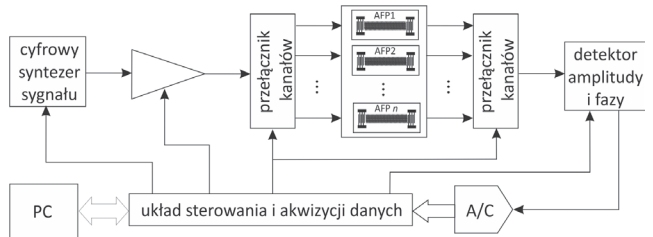
Czujnik z AFP, w swej klasycznej postaci, składa się z oscylatora elektrycznego, w którym pętla dodatniego sprzężenia zwrotnego zamykana jest przez przyrząd z falą powierzchniową (zwykle są to linie opóźniające lub rezonatory). Użytecznym sygnałem generowanym przez taki oscylator jest zmiana częstotliwości rezonansowej. Tego rodzaju podejście można spotkać niemal w całej dostępnej na ten temat literaturze. Rozwój elektroniki cyfrowej w ostatniej dekadzie, a w szczególności technologii układów programowalnych, umożliwił zastosowanie zupełnie nowego podejścia do konstrukcji systemów czujnikowych z AFP. Aczkolwiek możliwość taka istniała już wcześniej, to jednak istotną rolę odegrała możliwość znacznej miniaturyzacji podsystemów układu. Proponowane podejście polega na rezygnacji z zastosowania oscylatorów, w których w pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego pracowałyby przyrządy z AFP, na rzecz systemu z wymuszeniem zewnętrznym. Obok podzespołu z AFP składa się on zasadniczo z trzech bloków: stabilnego generatora z liniową bądź schodkową modulacją częstotliwości, przetwornika analogowo-cyfrowego oraz cyfrowego bloku przetwarzania sygnałów (Rys. 2).



Rysunek 2 Ogólna architektura układu

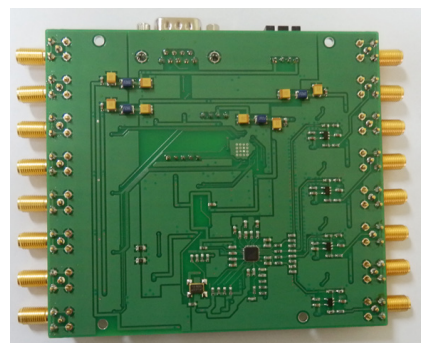
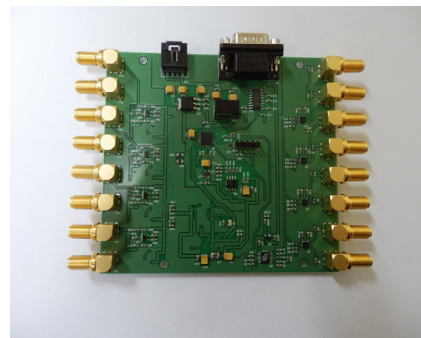
Takie podejście może wydawać się nadmiernie skomplikowane, jednak paradoksalnie łatwiej jest nad nim zapanować niż nad systemem w wersji analogowej, a przy tym oferuje ono szereg zupełnie nowych możliwości. Tak skonstruowany system generuje sygnał koherentny i może precyzyjnie śledzić charakterystykę amplitudowo-fazową przyrządu z AFP w paśmie dochodzącym do 3 MHz z rozdzielczością rzędu 1 Hz. System pozwala też obserwować zmiany ww. parametrów dla różnych mocy fali akustycznej, a więc także efekty nieliniowe. Z uwagi na możliwość regulacji mocy sygnału sondującego oraz jego wysoką stabilność amplitudową i częstotliwościowo-fazową system jest znacznie odporniejszy na zrywanie drgań i nie wymaga ciągłego dostrajania. Daje też swobodę w wyborze przyrządów z AFP, daleko większą niż w systemie analogowym. Uzupełnienie go w prze-

łączniki elektroniczne umożliwia łatwą rozbudowę do wersji wielokanałowej, w której można oczywiście zastosować także tor odniesienia. Schemat blokowy takiego rozwiązania prezentuje Rysunek 3.



Rysunek 3 Schemat blokowy urządzenia wielokanałowego

System ten jest w istocie precyzyjnym wielokanałowym analizatorem charakterystyk transmisyjnych torów propagacji AFP. Uzyskane z jego zastosowaniem dane pomiarowe mogą być następnie przetwarzane i reprezentowane w różnorodny sposób za pomocą odpowiedniego oprogramowania. Fotografie wykonanego układu przedstawione zostały na Rysunku 4.



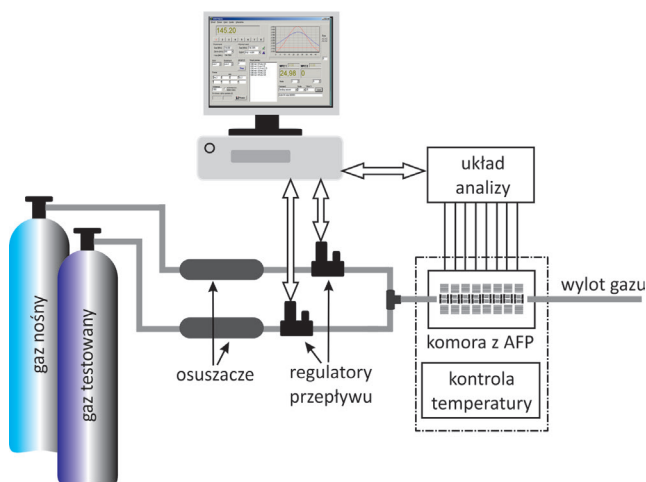
Rysunek 4 Awers i rewers wykonanego układu w wersji ośmiokanałowej

System wykonany został w technologii FPGA. Maksymalna moc generowanego sygnału wynosi 5 dBm (na  $R_L = 240 \Omega$ ), stabilność częstotliwości  $\Delta f = 0,5$  ppm, pasmo pracy  $B = 3$  MHz, maksymalna rozdzielczość częstotliwościowa  $\delta f = \pm 0,5$  Hz, zaś rozdzielczość pomiaru mocy sygnału 0,05 dBm.

#### 4. UKŁAD POMIAROWY

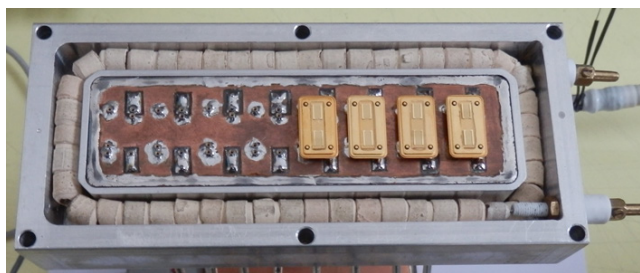
Schemat stanowiska do badania sensorów z AFP przedstawiono na Rysunku 5. Składa się ono z następujących elementów:

- komory pomiarowej, w której umieszczonych może być osiem sensorów z AFP;
- układu elektronicznej analizy czujników z AFP;
- układu wytwarzania mieszanin gazowych;
- komputerowego systemu sterowania i akwizycji danych.

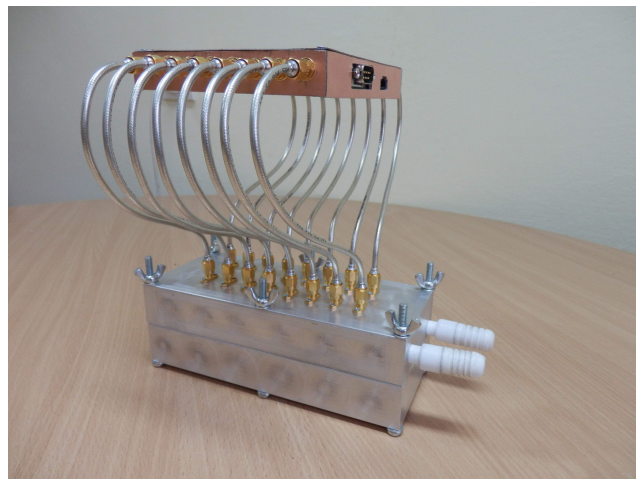


Rysunek 5 Schemat stanowiska do badania sensorów z AFP

Aluminiowa komora pomiarowa, w której umieszczone są sensory, ma kształt prostopadłościanu i składa się z dwóch części. W górnej znajduje się płytką drukowaną z podstawkami na rezonatory z AFP, umieszczone szeregowo w kierunku przepływu (Rys. 6). Z każdej podstawki wyprowadzone są dwa przewody, dołączone do gniazd SMA umieszczonych na górnej ścianie komory. Gniazda te połączone są półsztywnymi liniami koncentrycznymi z układem elektronicznym przedstawionym na Rysunku 5. Układ ten zamknięto w miedzianej obudowie, która separuje go od zakłóceń radiowych, pochodzących z telefonii komórkowej i innych źródeł (Rys. 7).



Rysunek 6 Górna część komory pomiarowej



Rysunek 7 Komora pomiarowa z układem elektronicznym

W dolnej części komory znajduje się kanał gazowy zakończony króćcami, którymi doprowadzana jest do czujników mieszanina gazowa, a następnie odprowadzana na zewnątrz. Kanał gazowy ma objętość około 20 cm<sup>3</sup>, co zapewnia bardzo szybką wymianę atmosfery w komorze, a w związku z tym małą stałą czasową układu. W dolnej części komory umieszczona jest także grzałka elektryczna, umożliwiającą regulację jej temperatury od pokojowej do 70°C. Grzałka zasilana jest napięciem przemiennym 24 V i sterowana regulatorem PID Shinko FCR-13A-S/M. Dokładność regulacji temperatury wynosi  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

W roli czujników zastosowano dwuportowe rezonatory z falą Rayleigha RS197. Produkowane są one w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie [11]. Są to przyrządy akustyczne dedykowane do zastosowań sensorowych, charakteryzujące się m.in. relatywnie szerokim 4 mm dystansem między przetwornikami. Umożliwia to nałożenie warstwy sensorowej na relatywnie dużą powierzchnię podłoża. Częstotliwość środkowa takiego rezonatora wynosi ok. 196,6 MHz, zaś podłożem jest stabilny temperaturowo kwarc STX. Jednakże opisywany układ elektroniczny jest uniwersalny i można stosować także przetworniki z AFP innego typu i innych producentów. Jedynym elementem dedykowanym do czujników RS197 są podstawki, dostosowane do geometrii ich wyprowadzeń.

System wytwarzania mieszanin gazowych stanowi osobny, niezależny układ, składający z dwóch, sterowanych komputerowo regulatorów masyowego przepływu Bronkhorst F-201C o zakresie regulacji 0-200 cm<sup>3</sup>/min (klasa dokładności 1%), osuszaczy oraz systemu przewodów gazowych i zaworów. Badany gaz oraz gaz rozcieńczający

podawane są z butli, poprzez układ chemicznych osuszaczy lub pojemniki z sitami molekularnymi, do regulatorów przepływu. Rodzaj zastosowanego związku suszącego zależy od badanego gazu i wymaganego poziomu wilgotności. W przypadku gazów obojętnych, takich jak azot, argon czy powietrze, dobrym rozwiązaniem są sита molekularne, jednak w przypadku par związków organicznych i gazów o większych cząsteczkach stosowane jest osuszanie chemiczne. Następnie, poprzez ustawienie odpowiednich przepływów na regulatorach, wytwarzana jest mieszanina gazowa o zadanym stężeniu i podawana do komory pomiarowej. Opuszczająca komorę mieszanka gazów przechodzi przez złożę węgla aktywnego, który usuwa z niej toksyczne składniki.

## 5. STEROWANIE I CYFROWE PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW

Stanowisko pomiarowe sterowane jest komputerowo, za pomocą oprogramowania zrealizowanego w środowisku programistycznym Delphi 7.0. Program steruje, poprzez system transmisji szeregowej RS-232, zarówno regulatorami masowego przepływu, jak i układem pomiarowym sensorów z AFP. Do jego głównych zadań należą:

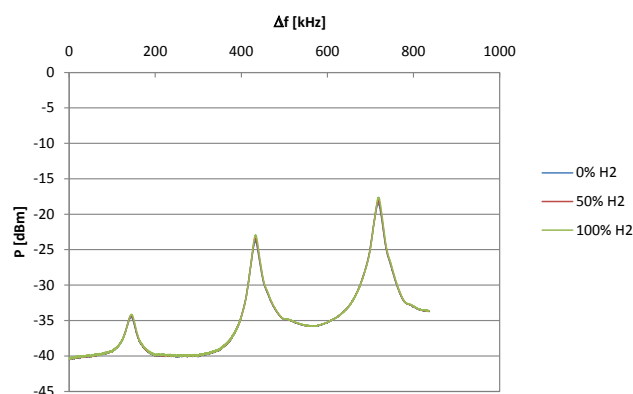
- wybór kanałów pomiarowych z matrycy sensorów, dla których prowadzony jest pomiar (może być skanowanych jednocześnie osiem kanałów lub tylko wybrane);
  - kontrola zakresu częstotliwości, w którym skanowane są sensory;
  - sterowanie układem generacji badanych mieszanin gazowych;
  - akwizycja danych pomiarowych, przetwarzanie sygnału przy pomocy zaimplementowanych algorytmów;
  - prezentacja przetworzonych wyników pomiarów, przetwarzanie oraz ich porównywanie.
- Oprogramowanie umożliwia daleko idącą automatyzację pomiarów.

### 5.1 Pomiar parametrów sensorów z AFP

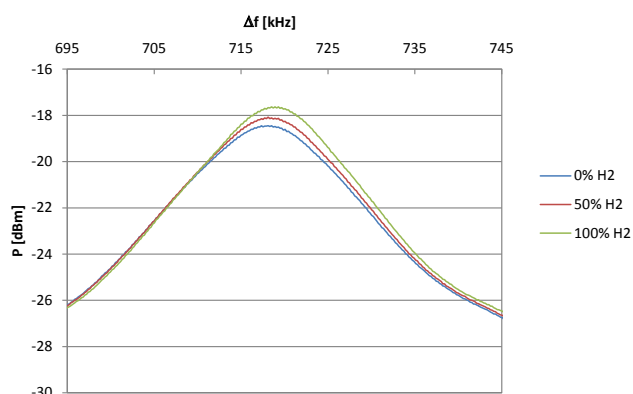
Układ elektroniczny umożliwia wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej sensorów mierząc ich tłumienie dla sinusoidalnego wymuszenia o schodkowo zmieniającej się częstotliwości. Zarówno krok zmiany częstotliwości, jak i liczba pomiarów w pojedynczym skanie są ustalone na stałe w oprogramowaniu układu FPGA i nie mogą być zmieniane przez końcowego użytkownika.

W przyjętym rozwiązaniu pojedynczy skan składa się z 256 punktów pomiarowych odległych o 192 Hz, co odpowiada pasmu 49 kHz. Układ sterowania pozwala jednak zmieniać częstotliwość startową, od której rozpoczyna się skanowanie. Zmieniając okresowo tę wartość, można uzyskać charakterystykę częstotliwościową sensora w szerokim zakresie częstotliwości, obejmującym nawet dziesiątki MHz (Rys. 8).

W wyniku oddziaływania badanego gazu na powierzchnię sensora przesunięciu ulegają piki rezonansowe i ich wysokość. Zakres pojedynczego skanu (49 kHz) został tak dobrany, aby dla typowych pomiarów obejmował przesuwający się wierzchołek piku rezonansowego w pełnym zakresie mierzonych stężeń (Rys. 9). Pomiar parametrów sygnału wyjściowego w zawężonym oknie odbywa się kolejno dla każdego aktywnego kanału (czujnika AFP) z jednoczesnym sterowaniem układem generacji mieszaniny gazowej.



Rysunek 8 Widmo częstotliwościowe sensora w zakresie 1 MHz



Rysunek 9 Przesunięcie piku rezonansowego na skutek zmiany stężenia badanego gazu

Pomiary takie pozwalają obliczyć częstotliwość i amplitudę śledzonego piku rezonansowego. Zwykle jest to najwyższy pik w widmie częstotliwościowym rezonatora, jednak interesujące informacje dotyczące mechanizmów oddziaływania analitu z warstwą sensorową można uzyskać analizując zachowanie sąsiednich plików, odpowiadających innym rodzajom fal akustycznych, które mogą być generowane w takim układzie. Aby uzyskać dokładne położenie piku, należy przed pomiarem przyjąć linię bazową nieco poniżej wierzchołka rezonansowego. Program oblicza i podaje położenie środka ciężkości pola ograniczonego linią bazową i kształtem piku. W ten sposób, pomimo fizycznej rozdzielczości pomiaru wynoszącej 192 Hz, uzyskuje się ekstrapolowaną rozdzielczość, odpowiadającą poziomowi szumów fazowych rzędu 1 Hz.

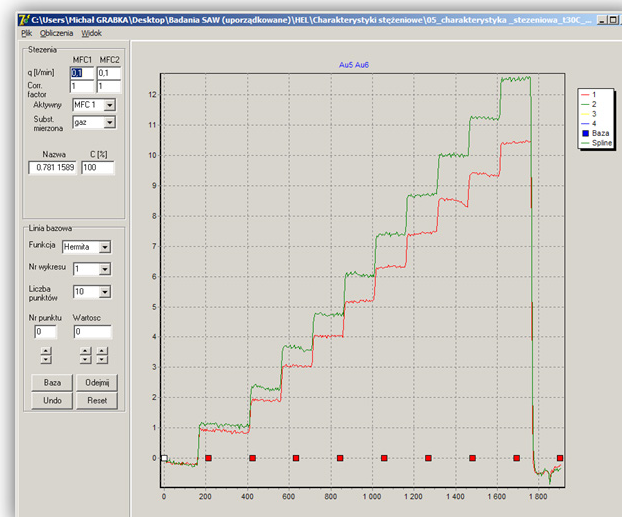
## 5.2 Sterowanie układem generacji mieszanin gazowych

Wytwarzanie mieszanin gazowych sprowadza się do regulacji natężenia przepływu gazów podawanych z dwóch butli za pomocą regulatorów masowego przepływu. Jeden z gazów zawiera aktywny składnik, który mierzony jest przez sensory z AFP, drugi jest gazem rozcieńczającym. W praktyce prezentowany układ pozwala na płynne rozcieńczanie gazu aktywnego w zakresie krotności od 0 do 100. Sterowanie regulatorami masowego przepływu odbywa się poprzez ręczne wprowadzanie nastaw do programu i przesyłanie ich do regulatorów, lub też za pomocą definiowalnego skryptu pomiarowego.

## 5.3 Pomiar charakterystyk stężeniowych sensorów

Najważniejszą charakterystyką każdego sensora chemicznego jest zależność pomiędzy stężeniem badanej substancji i sygnałem, rozumianym tutaj jako położenie i wysokość wybranego piku rezonansowego (częstotliwość i tłumienie AFP). Ze względu na mnogość parametrów, które w trakcie takich pomiarów należy kontrolować, oprogramowanie umożliwia posługiwanie się skryptami pomiarowymi. Skrypt składa się z wierszy zawierających trzy pozycje: ustawienia dwóch regulatorów przepływu oraz czas, przez który te ustawienia będą utrzymywane. Przez zadany czas stężenie mierzonej substancji pozostaje stałe, co pozwala na pomiary wybranych sygnałów. Kolejny wiersz

skryptu zmienia ustawienia regulatorów, tak aby można było uzyskiwać określone stężenie badanej substancji. Poprzez stopniowe rozcieńczanie lub zatężanie badanej substancji otrzymuje się charakterystykę stężeniową czujnika, która zapisywana jest do pliku tekstowego. Na Rysunku 10 przedstawiono przykładowy pomiar charakterystyki stężeniowej dwóch sensorów, gdzie zwiększono skokowo stężenie badanej substancji.



**Rysunek 10** Okno pomiaru charakterystyki stężeniowej dwóch sensorów; skrypt pomiarowy zmienia stężenie mierzonego gazu w zadany sposób. Na osi rzędnych zmiana częstotliwości czujnika, na osi odciętych kolejne interwały pomiarowe

Przydatną funkcją związaną z układem generacji badanych mieszanin jest możliwość automatycznego przeliczania stężeń. Program umożliwia obliczanie stężenia mieszanin gazowych, wilgoci, jak również par substancji generowanych ze wzorców dyfuzyjnych.

Aplikacja pozwala ponadto na cyfrowe przetwarzanie uzyskanych wyników i wzajemne ich porównywanie. Do najważniejszych funkcji z tego obszaru należy usuwanie szumów z wykresu oraz odejmowanie linii bazowej. Wbudowane zostały także funkcje testujące poprawność działania czujników z AFP i kontrolerów przepływu.

## 6. PODSUMOWANIE

Opisane stanowisko pomiarowe wykorzystuje nowe podejście do konstrukcji układów ekstrakcji informacji z czujników z AFP. Daje ono możliwość nie tylko pomiaru zmian prędkości, lecz również amplitudy i fazy AFP. Pozwala ponadto na obserwację zmian widma częstotliwościowego czujni-

ka. Dzięki tym cechom uzyskana została możliwość analizowania różnorodnych oddziaływań pomiędzy warstwą sensorową a jej bezpośrednim otoczeniem. Aczkolwiek system wydaje się być daleko bardziej złożony niż stosowana wcześniej metoda wykorzystująca pomiar częstotliwości oscylatorów z AFP, to jednak z punktu widzenia współczesnej elektroniki różnica ta jest niewielka, a zalety systemu z dużym naddatkiem rekompensują ten niedostatek.

System został przystosowany do pomiaru parametrów w ośmiu niezależnych kanałach. Pozwala

to na jednoczesną realizację kilku badań oraz zastosowanie metod rozpoznawania wzorców opartych o sieci neuronowe i inne techniki chemometryczne. Stanowisko wyposażono dodatkowo w sterowany komputerowo system wytwarzania mieszanin gazowych oraz wilgoci, co umożliwi automatyczne pomiary charakterystyk stężeniowych badanych czujników.

Konstrukcja ta została zaprojektowana, wykonana i z powodzeniem przetestowana w szeregu prac badawczych i dydaktycznych, prowadzonych w WAT.

## LITERATURA

- [1] Ballantine Jr. D. S., Martin S. J., Ricco A. J., Frye G. C., Wohltjen H., White R. M., Zellers E. T., Acoustic wave sensors. Theory, design, and physico-chemical applications, San Diego, Academic Press 1997.
- [2] Mitzner K., Berkenpas E., Sternhagen J., Karlgaard M., Wold C., Galipeau D., A direct digital synthesis system for surface acoustic wave sensors, Proceedings of the 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 6-8.06.2001, Seattle, USA, 449-453, DOI: 10.1109/FREQ.2001.956271.
- [3] Rapp M., Reibel J., Voight A., Balzer M., Bülow O., New miniaturized SAW-sensor array for organic gas detection driven by multiplexed oscillators, Sens. Act. B 64 (2000) 169-172.
- [4] Wen W., Shitang H., Shunzhou L., Minghua L., Yong P., Enhanced sensitivity of SAW gas sensor coated molecularly imprinted polymer incorporating high frequency stability oscillator, Sens. Act. B 125 (2007), 422-427.
- [5] Matatagui D., Martí J., Fernández M. J., Fontecha J. L., Gutiérrez J., Gràcia I., Cané C., Horrillo M. C., Chemical warfare agents simulants detection with an optimized SAW sensor array, Sens. Act. B 154 (2011), 199-205.
- [6] Wohltjen H., Dessy R., Surface acoustic wave probe for chemical analysis. I. Introduction and instrument description, Anal. Chem. 51, 9 (1979), 1458-1464.
- [7] Grate J. W., Martin S. J., White R. M., Acoustic wave microsensors, Anal. Chem. 65, 21 (1993), 940A-948A.
- [8] Wohltjen H., Dessy R., Surface acoustic wave probe for chemical analysis. III. Thermomechanical polymer analyzer, Anal. Chem. 51, 9 (1979), 1470-1475.
- [9] Pasternak M., New approach to Rayleigh wave propagation in the elastic halfspace – viscoelastic layer interface, Acta Physica Polonica A 114 (2008), A167-A172.
- [10] Pasternak M., An analytical solution of Rayleigh wave propagation problem on elastic substrate with nonconductive viscoelastic layer, Acta Physica Polonica A 116 (2009), 371-374.
- [11] Karta katalogowa rezonatora RS197, [http://www.itme.edu.pl/tl\\_files/Zaklady/Z-21/Z21%20-%20Oferta/RS197.pdf](http://www.itme.edu.pl/tl_files/Zaklady/Z-21/Z21%20-%20Oferta/RS197.pdf) na dzień 26.10.2015 r.