

# CZUJNIKI AKUSTYCZNE

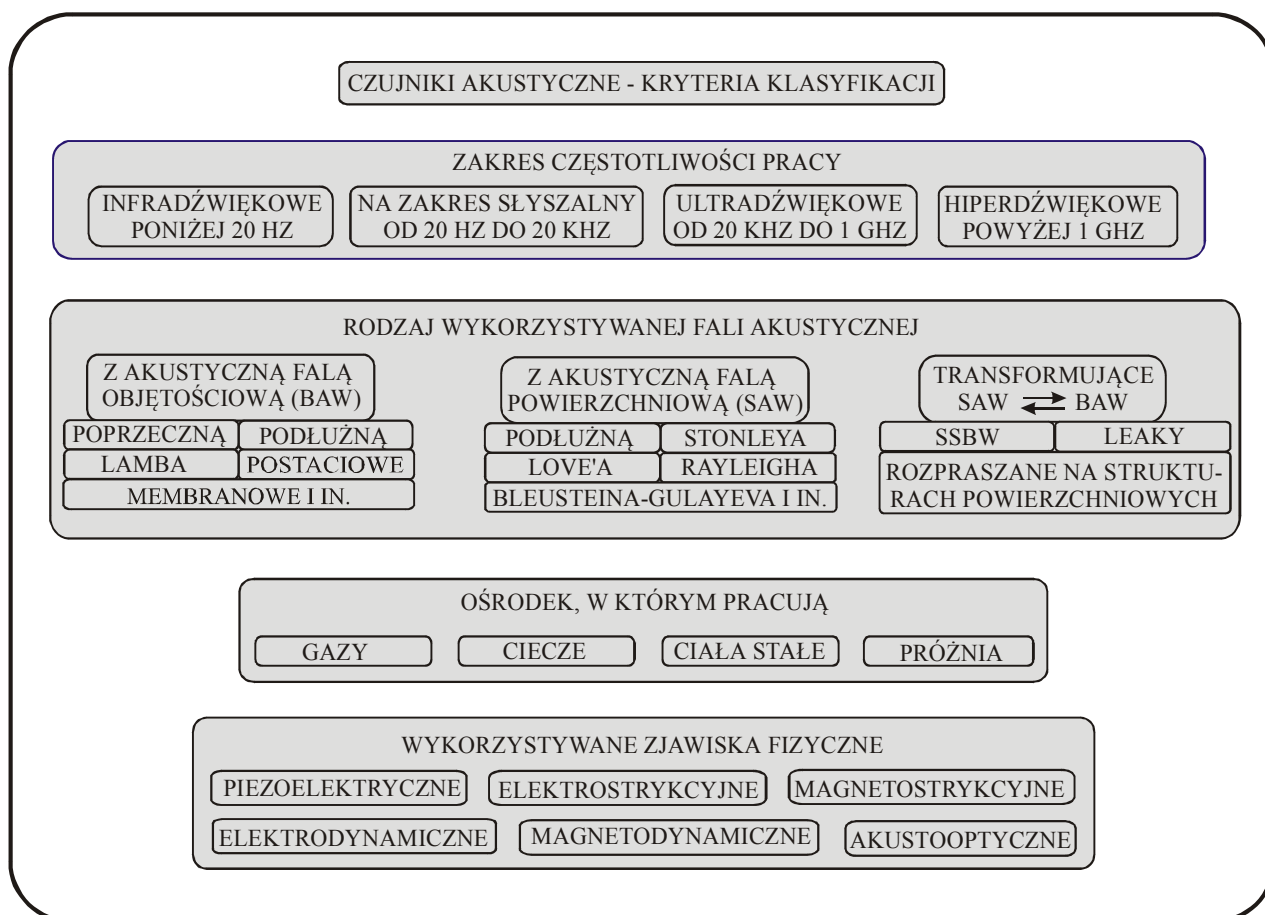
Mateusz Pasternak

Warszawa 2005

## 1. Wprowadzenie

W wielu ośrodkach naukowo badawczych, przede wszystkim w USA, intensywnie rozwijane są od dłuższego czasu techniki sensorowe wykorzystujące objętościowe i powierzchniowe fale akustyczne rozchodzące się w gazach, cieczach oraz ciałach stałych. Znajdują one, bądź w najbliższym czasie znajdą zastosowania właściwie we wszystkich rodzajach wojsk począwszy od piechoty poprzez lotnictwo, a skończywszy na marynarce. Czujniki akustyczne okazują się bowiem niezastąpione w wykrywaniu zmian parametrów ośrodków optycznie, a także radiowo nieprzeźroczystych. Wiele z nich wzorowanych jest na rozwiązaniach zaczerpniętych ze świata przyrody (nietoperze, skorpiony piaskowe, delfiny, wieloryby i in).

W celu uchwycenia dużej różnorodności w tej dziedzinie i zarysowania kierunków badań wygodnie będzie wprowadzić pewien umowny podział sensorów akustycznych przedstawiony na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Umowny podział czujników akustycznych

Rozwinięcia akronimów z rys. 1.1 są następujące:

BAW - bulk acoustic waves - czyli akustyczne fale objętościowe; zarówno poprzeczne jak i podłużne propagujące się w ciałach stałych (skrót BAW będzie w niniejszym opracowaniu używany także w odniesieniu do wszelakich typów akustycznych fal objętościowych; jak np. fale ciśnienia, dystorsji, odkształceń i in. w gazach i cieczach - również w przypadku fal stojących);

SAW - surface acoustic waves oznacza wszystkie fale typu powierzchniowego w ciałach stałych. Polskojęzyczny odpowiednik tego skrótu to AFP ozn. akustyczne fale powierzchniowe – jeśli nie zaznaczono inaczej są to fale Rayleigha;

SSBW – surface skimming bulk wave (przypowierzchniowe fale muskające) - fale propagujące się tuż pod powierzchnią ciał stałych.

Trzeba tu podkreślić, że obszar zastosowań czujników akustycznych jest niezwykle szeroki i dzielenie ich wg takiego kryterium nie ma większego sensu.

Zastosowania zależne są przede wszystkim od zakresu częstotliwości, który rozciąga się od pojedynczych Hz aż do kilkunastu GHz, a ich specyfikę odzwierciedlają nazwy podzakresów akustycznych od infra- do hiperdźwięków.

Sensory infradźwiękowe znajdują szerokie zastosowanie w sonolokacji w glebie i w cieczach. Szyki czujników mogą, po odpowiednim przetworzeniu sygnału umożliwić rozpoznanie z dużej odległości złóż mineralnych, dużych obiektów podziemnych, obiektów nawodnych czy też podwodnych, określić ich typ, a nawet konkretny egzemplarz, przy czym przezroczystość i stan wody nie mają tu większego znaczenia. Ich zasada działania jest analogiczna do klasycznych szyków antenowych ze stałą lub syntetyczną aperturą. Główne prace w tej dziedzinie skupiają się jednak nie tyle na samych czujnikach i ich wzajemnych relacjach fazowych, co na konstrukcji odpowiednich algorytmów przetwarzania sygnałów oraz budowie baz danych do porównań. Technikę tę próbuje się przenieść (ze znacznym już powodzeniem) także w zakres częstotliwości słyszalnych. Pierwszy raz czułe mikrofony do wykrywania obiektów latających zastosowano w bitwie o Anglię podczas II Wojny Światowej, jednak od tego czasu technika ta została znacznie ulepszona.

Szyk mikrofonów umieszczony pod kadłubem samolotu może ze znacznej odległości wykryć znajdujący się pod osłoną lasu oddział partyzantów. Jediną skuteczną metodą kamuflażu jest w tym przypadku niemal całkowita cisza bowiem za pomocą odpowiedniej filtracji daje się zwykle rozróżnić dźwięki sztuczne od naturalnych. Taka sama technika udoskonalana jest w celu rozpoznawaniu źródeł fal rozchodzących się w gruncie (tu wykorzystywane są przede wszystkim infradźwięki). Dąży się przy tym do uzyskania precyzji podobnej jak w przypadku sonolokacji w cieczech. W tym jednak wypadku skuteczny kamuflaż wydaje się niemal niemożliwy, natomiast system taki jest mało odporny na zakłócenia.

Czujniki pracujące w zakresach ultradźwiękowych i hiperdźwiękowych mają zgoła inne zastosowania. Powodem tego jest silne tłumienie dźwięków na tych zakresach częstotliwości (najsłabsze w ciałach stałych) oraz specyficzne ich właściwości. Umożliwiają one m. in. homogenizację cieczy, które w warunkach normalnych nie mieszają się ze sobą, zabijają drobnoustroje, a ich większe natężenia małe zwierzęta (żaby, ryby), są też szkodliwe dla człowieka – przy dużych mocach zabójcze. Przyjmuje się, że moc akustyczna dla fali ciągłej wyższa od  $100 \text{ mW/cm}^2$  jest niebezpieczna dla zdrowia

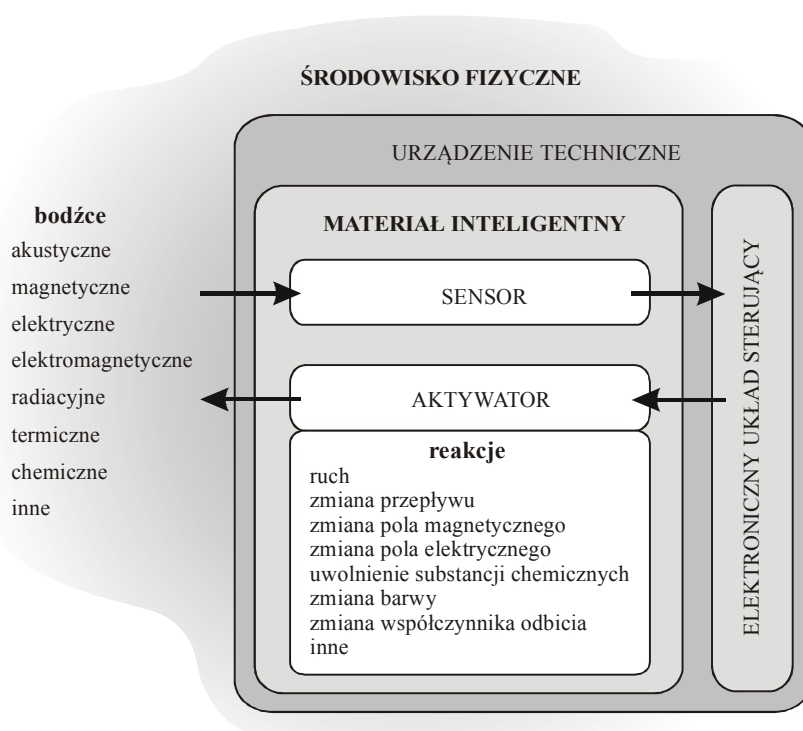
Czujniki ultradźwiękowe znajdują zastosowanie najogólniej rzecz ujmując w:

- sonolokacji,
- defektoskopii bardzo małych (mikromechanika) i bardzo dużych przedmiotów (kadłuby),
- zdalnej defektoskopii (np. pomiar parametrów wirujących elementów),
- detekcji i zdalnej detekcji wielkości nieelektrycznych (przemieszczeń, przyspieszeń, itd.),
- detekcji gazów i mieszanin gazów (elektroniczne nosy lub krótko e-nosy).

Podkreślić tu należy, że są one często jednym z dwóch najważniejszych składników tzw. materiałów inteligentnych (smart materials) intensywnie ostatnio badanych. Jest ważne z punktu widzenia niniejszego opisu, że najczęściej stosowanymi czujnikami w materiałach tego typu są właśnie układy z BAW i SAW.

Materiały inteligentne to zwarte połączenie sensorów i aktywatorów w czyli układy, które potrafią nie tylko odebrać bodziec, ale i nań odpowiednio szybko zareagować. Ich działanie opiera się zwykle na wykorzystaniu takich zjawisk jak elektrostrykcja, magnetostrykcja oraz piezoelektryczność. Ostatnie z wymienionych zjawisk jest z punktu

widzenia zastosowań technicznych szczególnie cenne (najczęściej też wykorzystywane) z uwagi na istnienie zarówno efektu piezoelektrycznego prostego jak i odwrotnego z jednoczesną względną łatwością w operowaniu polem elektrycznym, co oznacza, że rolę sensora i aktywatora może pełnić ten sam fragment materiału. W tym sensie podłoża z SAW funkcjonujące w oparciu o obydwa te efekty można uznać za pewnej klasy materiały inteligentne. Należy podkreślić, że od dłuższego czasu dział inżynierii materiałowej zajmujący się tego typu strukturami intensywnie jest rozwijany w kierunku teorii i technologii (szczególnie nanotechnologii), a uzyskane wyniki są niemal natychmiast wdrażane. Jak się wydaje w dziedzinie tej przodują Japonia i USA. Istotę działania takiego materiału ilustruje rys. 1.2.



Rys. 1.2. Materiał inteligentny jako składnik urządzenia technicznego. Wykrycie bodźca i reakcja na ten bodziec realizowane są w ramach tej samej struktury ciała stałego

Interesującym przykładem zastosowania materiału inteligentnego może być opracowana w 2002 r. w firmie R&D rakietka tenisowa, w której w miejsce klasycznych strun zastosowano włókna piezopolimerowe sprzężone elektrycznie z umieszczonym w rękojeści układem elektronicznym. W momencie odbicia struny wysyłają do układu elektronicznego energię elektryczną zawierającą informacje o sile uderzenia i rotacji piłki. Energia ta po szybkim przetworzeniu wraca z powrotem do strun w celu optymalizacji ich

naciągu. W efekcie uzyskuje się dynamiczną zmianę parametrów rakiety w zależności od stylu gry przeciwnika.

Jednym z ważniejszych zastosowań materiałów inteligentnych są aktywne układy tłumienia drgań. Zwykle problemy tego typu były rozwiązywane, z większym lub mniejszym powodzeniem, poprzez zastosowanie różnego typu tłumików mechanicznych, hydraulicznych czy pneumatycznych bądź też, jeśli to było możliwe, izolowanie drgań. Materiały inteligentne otworzyły w tym zakresie zupełnie nowe perspektywy. Dla przykładu w koncernie Toyota opracowano samochodowy układ tłumienia drgań generowanych przez jezdnię. Czujnik kompozytowy (z BAW) składający się z ok. pięciu warstw ceramiki piezoelektrycznej wykrywa drgania jezdni dostarczając informacje do układu elektronicznego. Energia po przetworzeniu wraca do aktywatora (ok. 100 warstw ceramiki), który pełni rolę tłoka i jest sprzężony z odpowiednim układem hydraulicznym. W ten sposób generowane przez jezdnię drgania wytwarzają odpowiednią reakcję układu powodującą ich niemal natychmiastową kompensację.

W niektórych zastosowaniach piezosensor jest w stanie wytworzyć taki nadmiar energii, że układ działa bez zewnętrznego zasilania. Taka samozasilająca się elektronika jest jeszcze w fazie prób, ale zapewne szybko zostanie skomercjalizowana. Jest prawie pewne, że intensywne badania w tym kierunku prowadzi się w wielu placówkach wojskowych na całym świecie. Niestety dostępne na ten temat informacje są raczej marginalne. Wiadomo np., że umieszczenie w pobliżu rozmówców niczym z pozoru nie wyróżniającej się popielniczki wykonanej z takiego materiału umożliwia zdalny podsłuch rozmowy, zaś to czy jest to zwykła popielniczka czy specjalna jest możliwe do określenia dopiero po specjalistycznych badaniach. Nie musi to nawet być konkretny przedmiot, wystarczy powłoka (piezopolimery), fragment zasłony itp.

W 2000 r. wartość sprzedaży na rynku ceramik i kompozytów piezoelektrycznych w samych tylko Stanach Zjednoczonych osiągnęła 222 miliony dolarów amerykańskich, zaś na koniec tego roku sprzedaż ta ma wzrosnąć do 340 milionów. Dane obrazujące rynek amerykański przedstawia poniższa tabela.

TABELA 1.1. SPRZEDAŻ MATERIAŁÓW PIEZOELEKTRYCZNYCH W USA

rynek materiały	sprzedaż w 2000 r. [mln. USD]	prognoza sprzedaży na 2005 r. [mln. USD]	średni przyrost roczny [%]
piezoceramiki	200	294	8
piezokompozyty	7	16	18
piezopolimery	15	30	15
razem	222	340	8,9

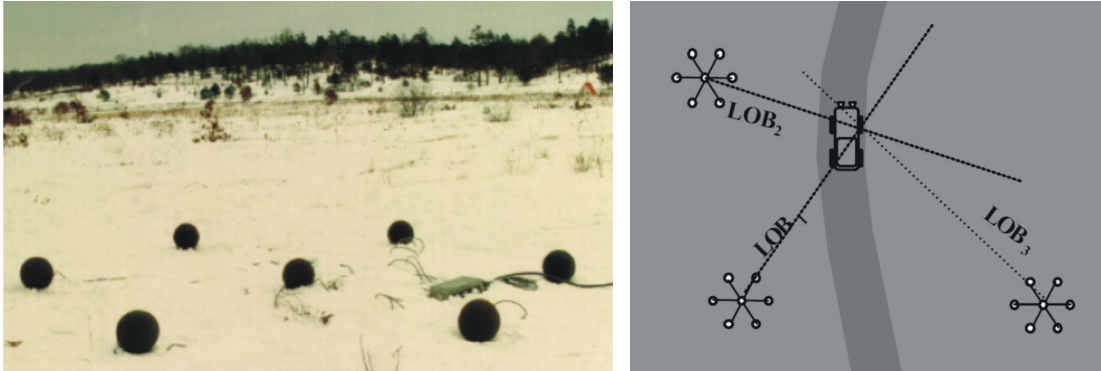
Prognozy przedstawione w tabeli 1.1 mogą być znacznie zaniżone z uwagi na fakt ekspansywnego wzrostu zastosowań piezokompozytów, a szczególnie materiałów inteligentnych w najmniej oczekiwanych obszarach, o czym świadczą przytoczone wcześniej przykłady. Przepuszczalnie większość sprzedawanych materiałów stanowi bazę dla konstrukcji różnego typu czujników akustycznych oraz materiałów inteligentnych.

Istotnym aspektem dotyczącym rozwoju czujników akustycznych są także nowe materiały (piezoelektryczne, elektrostrykcyjne i in.) i intensywne badania prowadzone w celu ich opracowania i uzyskania.

## 2. Czujniki infradźwiękowe i pracujące w zakresie słyszalnym

Ten typ sensorów stosowany jest w wojsku już od dawna ale należy się spodziewać, że będzie coraz szerzej wykorzystywany. Przykłady istniejących już urządzeń pokazane są poniżej.

Rys. 2.1. ilustruje zestaw mikrofonów (geofonów) do nasłuchu fal dźwiękowych rozchodzących się w piaszczystym podłożu.



Rys. 2.1. Szyk siedmiu mikrofonów do sonolokacji naziemnej oraz metoda nasłuchu.

Parametry minimalne: zakres częstotliwości 7-500 Hz, stabilność amplitudy  $0,1 \cdot f$  [%], stabilność fazy  $0,06 \cdot f$  [°], zakres dynamiczny 120 dB

Bardziej złożone szyki mikrofonów mogą mieć dość wąską charakterystykę kierunkową, wtedy możliwe staje się namierzanie i rozpoznawanie sztucznych źródeł dźwięków tylko z jednej pozycji. Dostatecznie czuły zestaw może ze stosunkowo dużej odległości wykrywać ruch nawet pojedynczego żołnierza, przy czym bardzo trudno go zakłócić (uaktywni go każdy sztuczny hałas).

Na rys. 2.2 zilustrowane zostało interesujące polowe urządzenie bazujące na trzech mikrofonach i służące do lokalizacji snajperów.



Rys. 2.2. Szyk trzech mikrofonów do wykrywania snajperów





System PILAR

Szyki mikrofonów mogą też być umieszczane na pojazdach i służyć do prowadzenia namiarów na wszystkie typy broni (rys. 2.3).

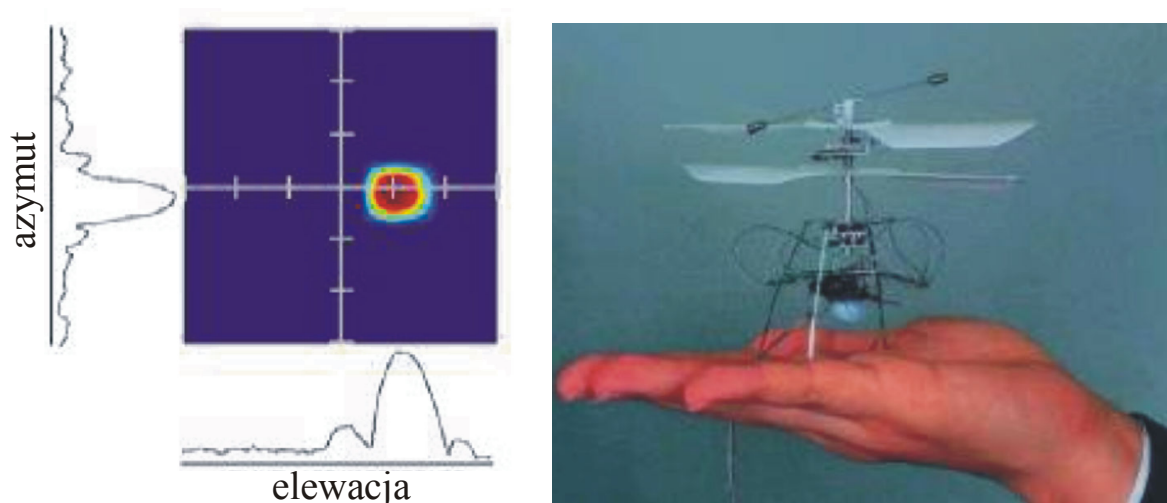


Rys. 2.3. Mobilny zestaw mikrofonów

Zaawansowane są także prace nad zastosowaniem szyków mikrofonowych w samolotach z przeznaczeniem do lokalizacji sztucznych źródeł dźwięków znajdujących się za nieprzeźroczystymi zasłonami. Metoda taka wydaje się szczególnie przydatna do wykrywania dobrze zamaskowanych w lasach oddziałów partyzanckich. W celu minimalizacji hałasu własnego idealnym rozwiązaniem mogą się okazać małe, zdalnie

sterowane samoloty napędzane cichymi silnikami piezoelektrycznymi (stąd też i ta dziedzina rozwija się prężnie).

Rys. 2.4 ilustruje namiar uzyskany z takiego właśnie samolotu.



Rys. 2.4. Latające uszy. Namiar na sztuczne źródło dźwięków uzyskany z szyku mikrofonów umieszczonego pod samolotem (po lewej). Miniaturowy samolot EPSON  $\mu$ FR (po prawej) napędzany ultracichym silnikiem piezoelektrycznym – tego typu rozwiązanie wydaje się najlepsze do podwieszenia szyku mikrofonów

Pracuje się jednocześnie nad ulepszonymi algorytmami obróbki sygnałów, które pozwoliłyby nie tylko na lokalizację źródeł dźwięków, ale także określenie konkretnego typu, a nawet egzemplarza broni generującego określony hałas (rys. 2.5).



Rys. 2.5. Niedaleka przyszłość (teraźniejszość?) – rozpoznawanie typów (a nawet konkretnych egzemplarzy) obiektów na podstawie generowanych przez nie dźwięków

Na rys. 2.5 przedstawiony jest elektroniczny montaż wykonany pięć lat temu. Możliwe, że tak dokładne urządzenia już istnieją.

Na zakończenie tego podrozdziału wypada dodać, że pracuje się także nad czujnikami akustycznymi wykonanymi technikami MEMS (micro electro-mechanical systems) (JPL oraz uniwersytety w Bostonie, Yale, Maryland). Urządzenia te w postaci implantów mają docelowo służyć leczeniu głuchoty.

### 3. Czujniki akustyczne na zakres ultradźwięków

Namierzanie obiektów na dużych odległościach za pomocą ultradźwięków wymagałoby zastosowania bardzo dużej mocy i z tego powodu jest to metoda nieefektywna i raczej niewykorzystywana, niemniej na małych dystansach stosowane bywają ultradźwiękowe czujniki ruchu. Czujniki pracujące w tym zakresie częstotliwości znakomicie nadają się też do diagnostyki (szczególnie medycznej i tam są szeroko wykorzystywane) czy też defektoskopii.

Wzrost skomplikowania konstrukcji spowodował, że wykrywanie w nich ukrytych wad metodą ultradźwiękową staje się coraz bardziej czasochłonne i kosztowne. W samolotach, statkach, czy też pojazdach lądowych nie ma dostępu do wielu miejsc konstrukcji lub ich udostępnienie jest czasochłonne (wymaga np. demontażu). Z tego powodu notuje się tendencje do wyposażania wymagających okresowych badań elementów w czujniki umożliwiające monitorowanie ich stanu technicznego już w czasie produkcji. W wielu przypadkach monitoring polega na wykrywaniu pęknięć (np. w pobliżu łączów, w silnie obciążonych elementach), śledzeniu ubytków (np. korozyjnych) czy też rozwarstwień laminatu.

W badaniach elementów metalowych są to czujniki naklejane na powierzchnię, na przykład na blachy poszycia samolotu, a do badania elementów z kompozytu opracowywane są specjalne czujniki, które mogą być umieszczane wewnątrz struktury już w czasie jej wytwarzania. W ten sposób powstają elementy spełniające nie tylko swoje funkcje mechaniczne, ale również umożliwiające łatwą diagnostykę (SHM – smart health monitoring). Istnieją dwa sposoby akustycznego monitorowania stanu konstrukcji: pasywny i aktywny. Sposób pasywny polega na użyciu czujnika jako mikrofonu mogącego w sposób ciągły wykrywać drgania pochodzące od rozwijającego się uszkodzenia. Metoda aktywna bazuje na systemie nadawanie-odbiór i jest stosowana w czasie przerw w pracy konstrukcji. Do układu czujników podłączany jest wtedy wielokanałowy defektoskop.

Przykładem układu czujników zaprojektowanego do monitorowania stanu elementów z laminatów lub elementów metalowych jest układ Smart Layer czyli arkusz folii z tworzywa sztucznego (kaptan), na którego powierzchni ułożono małe przetworniki piezoelektryczne i przewody elektryczne. Taka technologia pozwala na dowolne umieszczanie czujników i prowadzenie przewodów w zależności od geometrii badanego elementu. Folia może być z jednej strony pokryta warstwą klejącą i przyklejona do metalowego elementu o powierzchni rozwijalnej (walec, stożek) lub ułożona między

warstwami laminatu w trakcie produkcji elementu kompozytowego. Smart Layer może być wykorzystany do monitorowania zmian naprężeń lub odkształceń struktury w funkcji czasu (na podstawie zmian czasów przejścia impulsów), wykrywania wad (na podstawie analizy zmian impulsów), monitorowania rozwoju pęknięć w próbce zbudowanej z dwóch blach ze stopu lekkiego połączonych dwurzędowym szwem nitowym (samoloty).

W przypadku tego typu defektoskopii pracuje się przede wszystkim nad lepszym poznaniem propagacji fal w strukturach o wysokim stopniu złożoności. Jej niewątpliwą zaletą jest możliwość częstego prowadzenia badań, możliwość ich pełnej automatyzacji, niskie koszty i czas badania oraz fakt, że czujniki mogą być zainstalowane w miejscach niedostępnych dla klasycznych metod badań nieniszczących.

Również w tym przypadku dąży się do mechanicznego zintegrowania z badanymi elementami elektrycznie sterowanych materiałów mogących nie tylko monitorować stan konstrukcji ale także aktywnie wpływać na jej własności (elementy inteligentne). Możliwości takie stwarzają produkowane od niedawna, wspomniane już włókna piezoelektryczne. Posiadają one moduł Younga zbliżony wartością do włókien szklanych i ich zatopienie w laminacie właściwie nie zmienia jego własności mechanicznych.

Produkcję włókien piezoelektrycznych i wykonanie z nich czujników opracowano w Instytucie Fraunhofera.

Inną cechą struktury z wbudowanymi w nią włóknami piezoelektrycznymi jest możliwość aktywnego tłumienia drgań. Sygnały z czujników informują układ kontrolny o wystąpieniu drgań, a układ reaguje wysyłaniem sygnałów elektrycznych docierających do znajdujących się w laminacie włókien piezoelektrycznych, które odpowiednio kurczą się lub wydłużają, przeciwdziałając drganiom struktury. W ten sposób konstrukcja wyposażona w działające pasywnie i aktywnie czujniki może samodzielnie przeciwdziałać powstającym w niej drganiom. Działające na tej zasadzie układy stosowane są już w samolotach do tłumienia drgań niektórych elementów.

Przewidywane są prace nad wykonaniem włókien z monokryształów piezoelektrycznych. Będą one posiadały wielokrotnie wyższą czułość od włókien wykonanych z drobnych ziaren ceramiki PZT i wielokrotnie większą skuteczność działania.

Czujniki ultradźwiękowe mogą być też stosowane do pomiaru sił w śrubach. Interesujące rozwiązanie w tym zakresie przedstawiły NASA Marshall Space Flight Center i firma ULTRAFST. Dzisiaj są to śruby przeznaczone głównie do łączenia różnych elementów konstrukcji w przestrzeni kosmicznej gdzie warunki pracy nie pozwalają na stosowanie ciężkich kluczy dynamometrycznych a jednocześnie konieczna jest kontrola

siły, z jaką połączenia śrubowe dociskają łączone elementy. Producenci inteligentnych śrub twierdzą, że w niedalekiej przyszłości znajdą one zastosowania nie tylko w technice kosmicznej, ale również w przemyśle samochodowym, nuklearnym czy chemicznym. Przy masowej produkcji koszt osadzenia warstwy piezoelektrycznej na śrubie nie powinien przekraczać kilku centów.

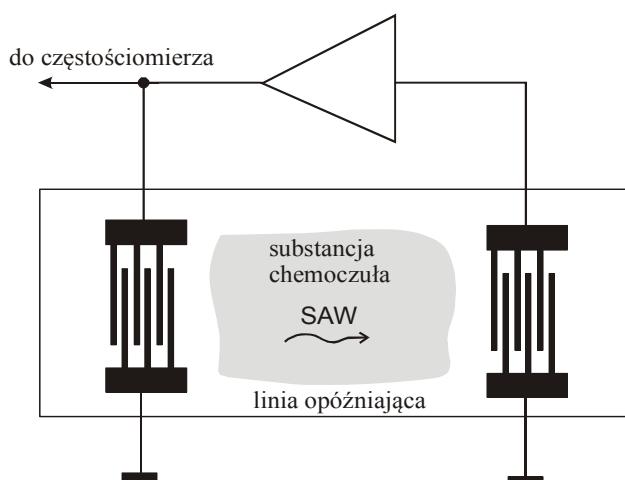
Przedstawione przykłady pokazują, że cechą charakterystyczną ultradźwiękowych czujników stosowanych do monitorowania stanu konstrukcji jest ich "płaskość" umożliwiająca naklejanie lub wręcz wklejanie w strukturę.

Układy takie są na stałe połączone z badanym elementem, nie występuje więc problem niestałości sprzężenia akustycznego. Umożliwia to prowadzenie kontroli stanu struktury nie tylko podczas remontów, ale również w czasie pracy, co bardzo podnosi prawdopodobieństwo wczesnego wykrycia wady.

#### 4. Czujniki z akustyczną falą powierzchniową

Spośród wszystkich czujników układy z akustyczną falą powierzchniową (SAW) mają prawdopodobnie najszersze pole zastosowań. Obok wymienionych już wyżej przykładów (układy SAW mogą często zastępować klasyczne układy z BAW) stosuje się je w szczególności do przetwarzania wielkości nieelektrycznych. W tym zakresie wyróżniają się one uniwersalizmem, prostotą i bardzo dużą czułością, a także, co jest ważne we współczesnej elektronice, niewielkimi wymiarami i niskim poborem mocy.

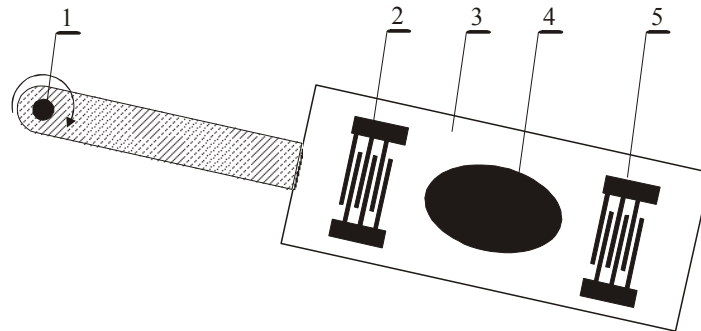
Zasada ich działania jest stosunkowo prosta i polega na wykorzystaniu zjawiska zmiany prędkości fali akustycznej generowanego zmianami stanu powierzchni piezoelektryka, po którym się ta fala propaguje. Dla przykładu realizacja czujnika stężenia gazu polega na pokryciu odpowiednią substancją chemoczułą obszaru propagacji fali. Nałożona warstwa reagując na obecność gazu oddziałuje na powierzchnię, wywołując efekt zmiany jej obciążenia masą czy też jej przewodnictwa elektrycznego. Efekty te z kolei wpływają na proporcjonalną, zmianę prędkości fali. Pomiar tej zmiany odbywa się zwykle po jej zamianie na odpowiednią zmianę częstotliwości generatora zbudowanego jak na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Linia opóźniająca z SAW pracująca w pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego. Spełnienie warunku amplitudy i fazy uzyskuje się poprzez dobór wzmocnienia i przesunięcia fazowego wprowadzanego przez wzmacniacz

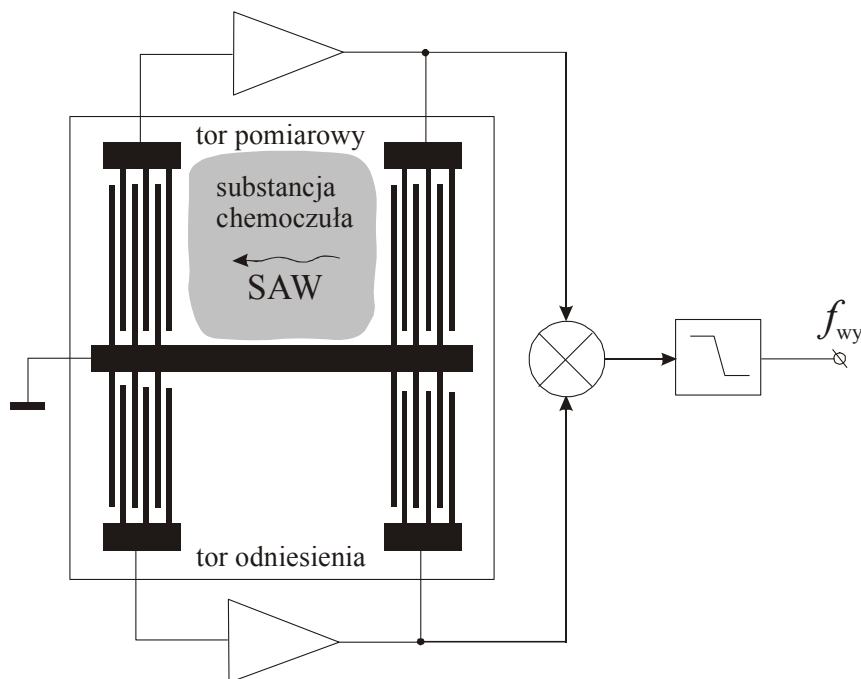
To proste i niedroge rozwiązanie umożliwia (zależnie od własności powierzchniowej warstwy czulej) wykrywanie zawartych w atmosferze substancji przy stężeniach rzędu nawet kilkunastu ppb. Technikę tę stosuje się także do wykrywania wilgoci, niewielkich fluktuacji temperatury, ultrafioletu i in.

W czujnikach ciśnienia, przyspieszenia itp. (ogólnie czujnikach naprężeń) wykorzystuje się zmianę stanu naprężenia powierzchni podłoża wywołaną mierzonymi siłami, która jak poprzednio przekłada się na zmianę prędkości fali. Na ogół siły te są mechanicznie sprzęgane z czujnikiem. Przykład czujnika siły odśrodkowej (możliwej do przeliczenia np. na przyspieszenie kątowe, prędkość kątową itp.) przedstawiono na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Czujnik siły odśrodkowej: 1 - oś obrotu, 2 - przetwornik wejściowy, 3 - podłoże, 4 - obciążnik, 5 - przetwornik wyjściowy. W wielu rozwiązaniach rolę obciążnika pełni sama powierzchnia

Dla zwiększenia precyzji pomiaru oraz zniwelowania wpływu czynników niepożądanych (np. temperatury) stosuje się zwykle układy różnicowe jak na rys. 4.3.



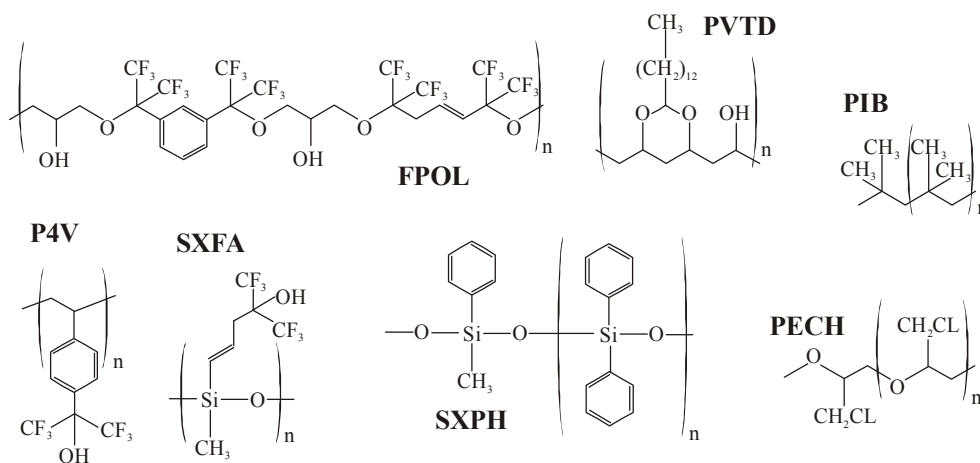
Rys. 4.3. Czujnik z AFP w układzie różnicowym. Sygnały z torów odniesienia i pomiarowego podawane są na mieszacz, a pomiarowi (po odfiltrowaniu) podlega różnica częstotliwości



W chwili obecnej prowadzone są w wielu ośrodkach intensywne prace w zakresie konstrukcji czujników z SAW (zwykle z falą Rayleigha) przeznaczonych do wykrywania złożonych substancji organicznych, a przede wszystkim środków trujących. Powodem intensyfikacji tych badań jest m.in. wzmożona światowa aktywność terroryzmu i świadomość względnej łatwości syntezy różnorodnych trucizn, których nawet niewielkie stężenie w powietrzu może stwarzać poważne zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi oraz zwierząt.

Klasyczny czujnik wykrywa tylko z góry określone substancje – nie jest więc uniwersalny. W Naval Research Laboratory, Washington, USA, Université Bordeaux, Francja i in. placówkach trwają prace zmierzające do uniwersalizacji takiego czujnika.

Kluczowe znaczenie w konstrukcji takich czujników mają bezspornie warstwy chemoczułe (stąd więc skupienie światowych ośrodków na ich syntezie – w tym także Instytutu Chemii Wojskowej Akademii Technicznej). Rys. 4.4 przedstawia niektóre polimery stosowane do detekcji par związków organicznych. Substancje te są głównie wykorzystywane jako fazy stacjonarne w chromatografii gazowej. Dla wielu tych polimerów oraz par organicznych wyznaczono wartości współczynników równania LSER (linear solvation energy relationship – równanie solwatacji), które umożliwiają teoretyczne wyznaczenie współczynnika podziału par pomiędzy fazę gazową i polimer.



Rys. 4.4. Przykładowe polimery stosowane do detekcji par związków organicznych **FPOL** – poli(fluoroalkohol), **PVTDT** – poli(winylotetradekan), **PIB** – poli(trójfluoropropyl), **P4V** – poli(4-winylokumina), **SXFA** – (heksafluoro-2-propanol)polisiloksan, **SXPH** – polisiloksan, **PECH** - poli(epichlorohydryna)

Istnieją przy tym ogólne reguły projektowania polimerów o zadanych własnościach. Ich parametry mogą być jakościowo oszacowane na podstawie występujących w nich grup funkcyjnych. Zależności te zebrano w tabeli 4.1.

TABELA 4.1. ODDZIAŁYWANIA POMIĘDZY NIEJONOWYMI ZWIĄZKAMI ORGANICZNYMI I POLIMERAMI

rodzaj oddziaływania i własności materiału	cechy strukturalne
kwasowe wiązania wodorowe	fluoroalkohole lub fluorofenole
zasadowe wiązania wodorowe, minimalna polarność	pierwszo- i drugorzędowe aminy alifatyczne
zasadowe wiązania wodorowe, duża polarność	amidy, sulfotlenki, tlenki fosfory, amino-N-tlenki, estry
dipol / dipol, polarne, minimalna zasadowość	nitryle, związki alifatyczne z grupami trójfluorometylowymi
dipol / indukowany dipol, polaryzowalność	ciężkie halogenki aromatyczne (bromki i jodki)
tylko oddziaływanie dyspersyjne	węglowodory alifatyczne

Aczkolwiek znalezienie odpowiednich polimerów ma tu kluczowe znaczenie to jednak parametry czujników chemicznych z SAW (przede wszystkim czułość i stabilność) zależą również od konstrukcji całego układu, a szczególnie jego części akustycznej i elektronicznej. Wiadomo np., że czułość układów z SAW w pierwszym przybliżeniu jest proporcjonalna do kwadratu częstotliwości, na której one pracują, stąd więc należy poszukiwać rozwiązań układowych w zakresie mikrofalowym. Z drugiej zaś strony mikrofalowe układy z SAW charakteryzują się bardzo małymi rozmiarami znacznie utrudniającymi nakładanie warstw chemoczułych i wykluczającymi wystawianie ich na działanie środowiska (period przetworników międzypalczastych jest w zakresie mikrofal porównywalny ze średnicą cząstek kurzu). Konieczne więc staje się poszukiwanie rozwiązań kompromisowych wykorzystujących np. wyższe harmoniczne, zrównoważone mieszanie i precyzyjną filtrację.

Optymalne rozwiązania w tym zakresie prawdopodobnie nie są znane, bądź też nie zostały opublikowane. W dostępnej literaturze przedstawiane są zwykle układy blokowe bez szczegółów konstrukcyjnych (ze względu na duże komercyjne znaczenie opisywanych tu czujników). Przewiduje się, że znajdą się one w najbliższej przyszłości na wyposażeniu armii USA (np. urządzenie o nazwie JCAD (the joint chemical agent detector) firmy BAE Systems). Nad odpowiednimi rozwiązaniami obok placówek zagranicznych (głównie

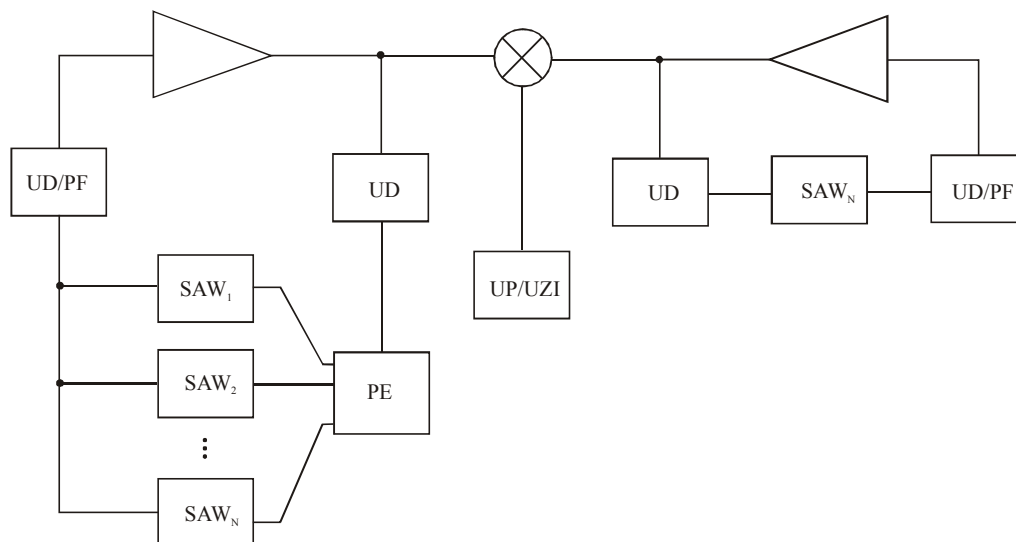
amerykańskich i francuskich) pracują też ośrodki polskie: Politechnika Śląska, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych i Wojskowa Akademia Techniczna. Badania te dotyczą raczej konstrukcji samych przetworników AFP oraz warstw chemoczułych. Istniejące opracowania działają w przeważającej liczbie w zakresie niskich częstotliwości (do kilkudziesięciu MHz). Z tego względu ważnym aspektem staje się opracowanie konkretnych rozwiązań układowych na częstotliwościach przynajmniej z zakresu dolnych mikrofal. Obok naturalnej poprawy czułości, zakres ten powinien otworzyć nowe perspektywy m.in. umożliwić zastosowanie precyzyjnej detekcji różnicy faz w miejsce dotychczas stosowanej detekcji różnicy częstotliwości torów pomiarowego i odniesienia. Z tego punktu widzenia atrakcyjne jawią się podłoża kwazipiezokompozytowe (opracowane w WAT). Efekt wzrostu czułości masowej będzie się wzmacniał w miarę zwiększania częstotliwości, co jest tutaj ważną zaletą kwazipiezokompozytów. Pewną niedogodność będzie stanowić tutaj zjawisko dyspersji, jednak można je minimalizować poprzez odpowiedni dobór ich właściwości. Na bazie kwazikompozytów można zbudować zupełnie nowy typ czujnika posiłkując się przedstawioną wcześniej koncepcją szyku sensorów.

Jej zastosowanie jest w tym przypadku o tyle prostsze, że impedancja akustyczna chemoczułych polimerów jest dużo wyższa niż np. wody, co znacznie ułatwia dopasowanie. Zastosowanie zjawiska konwersji modów objętościowych do modów powierzchniowych i vice versa umożliwia jak się wydaje konstrukcję czujnika, który zamiast reagować na zmianę masy warstwy chemoczułej (ewentualnie jej własności elektrycznych) sondowałby tą warstwę w celu wykrycia zmian jej gęstości. Teoria takiego układu pozostaje jeszcze w sferze koncepcji.

Interesującą ideą jest łączenie czujników gazu z SAW w grupy, z których każdy element reaguje na jedną z cech równania LSER lub też konkretny składnik mieszaniny gazów.

Takie struktury nazywane są e-nosami.

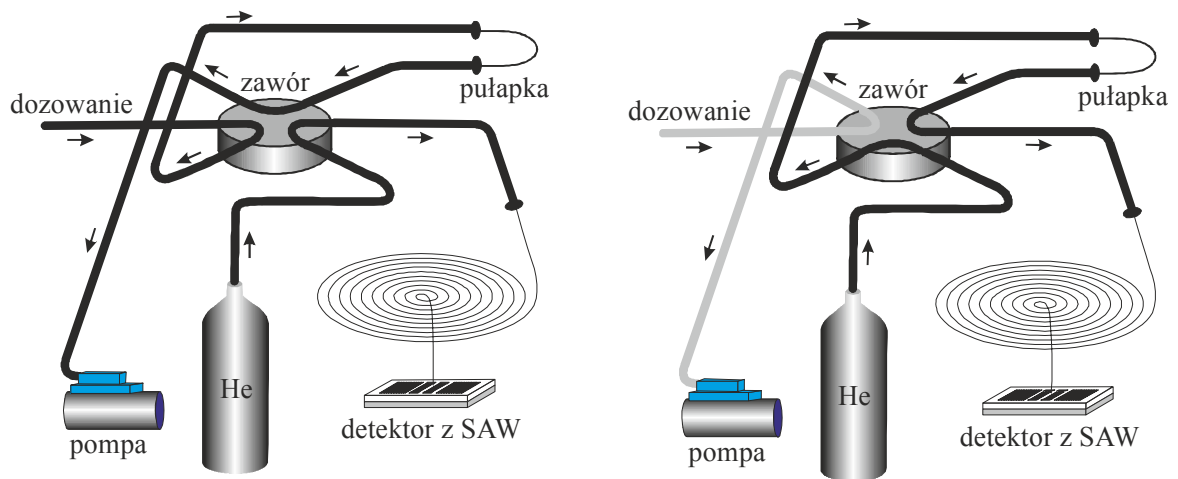
W e-nosach pracuje zwykle od kilku do kilkudziesięciu czujników w układach oscylatorów, przy czym każdy z nich pokryty jest inną substancją chemoczułą (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Schemat blokowy e-nosa. UD – układ dopasowania impedancji, PF – przesuwnik fazy, PE – przełącznik elektroniczny, UP – układ przetwarzania informacji, UZI – układ zobrazowania informacji

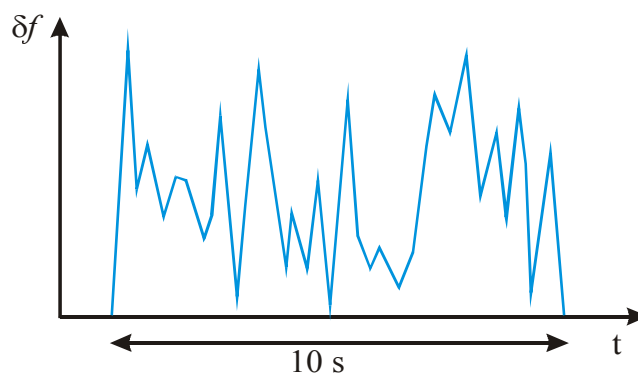
W klasycznym już wariancie e-nosa poszczególne oscylatory poprzez przełącznik analogowy dołączane są sekwencyjnie do mieszacza. Generowane częstotliwości, zależne od stężenia wykrywanych substancji, odejmują się tam od częstotliwości odniesienia generowanej przez układ wykorzystujący rezonator tego samego typu. Takie rozwiązanie dość dobrze kompensuje wpływ zewnętrznych czynników na pracę urządzenia (takich jak temperatura, ciśnienie, wilgotność itp). Układ taki niestety bardzo często daje odpowiedź nieortogonalną - różne pokrycia chemoczułe mogą reagować na te same gazy. Niektóre z nich nie ulegają też regeneracji (zbyt silnie wiążą cząstki zmieniając warunek równowagi) lub też zbyt szybkiej degradacji. Dużą jego zaletą jest jednak prostota układowa – w całości elektroniczna.

Drugim wariantem elektronicznych nosów są opatentowane w USA tzw. z-nosy (z-Nose<sup>TM</sup>), stanowiące połączenie kolumny chromatograficznej i detektora z SAW (tzw. GC/SAW system). Układ taki jest w pewnym sensie analogiem klasycznego e-nosa, ale emuluje działanie kilkuset czujników (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Z-nos posiada dwa tryby pracy. W pierwszym z nich (po lewej) pobierana jest próbka gazu, a kolumna chromatograficzna przepłukiwana gazem nośnym, w drugim zaś, po przełączeniu zaworu (po prawej) gaz z pułapki przedostaje się poprzez kolumnę chromatograficzną do detektora z SAW

Wariant ten, co prawda, jest bardziej skomplikowany od poprzedniego (zawiera m.in. układ zaworów, podsystem dostarczający gaz nośny i kolumnę chromatograficzną) jednak zawsze daje odpowiedź ortogonalną ponieważ mieszanina gazów jest w nim rozdzielana na frakcje. Wbrew pozorom urządzenie takie może mieć rozmiary wielkości laptopa. Na jego wyjściu otrzymuje się charakterystyczną odpowiedź (w postaci fluktuacji częstotliwości) w określonym przedziale czasu (chromatogram – rys. 4.7).



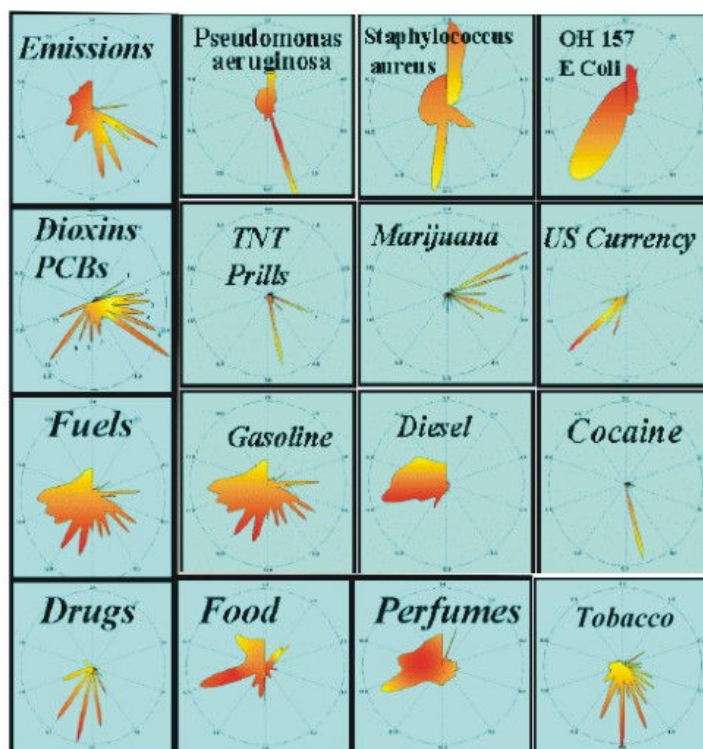
Rys. 4.7. 10-sekundowy chromatogram. Piki amplitudy są odpowiedziami detektora z SAW na docierające do jego powierzchni kolejne frakcje gazu

Korzystając z faktu, że każda mieszanina gazów posiada swój unikalny chromatogram można ją rozpoznać poprzez porównanie uzyskanego przebiegu z wzorcami oraz, na podstawie amplitud określić stężenie poszczególnych frakcji. W tym wypadku detektor nie posiada warstwy chemoczułej (oraz wad z wiązanych z jej regeneracją, starzeniem itp.)

i jest dużo szybszy. System taki osiąga duże czułości jeśli tylko jest wyposażony w układ wstępnego zateżania gazu. Podobnie jest też w przypadku e-nosa.

Obliczenia wskazują jednak, że możliwe jest osiągnięcie podobnie wysokich czułości poprzez modyfikację samego detektora z SAW. Modyfikacja taka uprościłaby i przyspieszyła działanie urządzenia. Próby nad taką modyfikacją prowadzone są od roku w WAT. Z-nosy są uniwersalnym narzędziem detekcyjnym przeznaczonym do wykrywania bardzo wielu zapachów. Trzeba podkreślić, że słowo zapach jest tu rozumiane jako poruszające się swobodnie w gazie lub cieczy cząstki pewnego związku chemicznego, które podlegają wykrywaniu. Zależnie od liczby tych cząstek zapach jest mniej lub bardziej intensywny. W analogiczny sposób działa zmysł powonienia u ssaków, ale jest on ograniczony do określonych substancji i wykrywa raczej duże ich stężenia. Elektroniczne nosy mogą być pod jednym i drugim względem daleko lepsze – czulsze i ignorujące pojęcie bezwonności.

Na rys. 4.8. pokazano radialne chromatogramy wybranych substancji aby zilustrować możliwości urządzenia.



Rys. 4.8. Radialnie zobrazowane chromatogramy zapachów wybranych substancji oraz mikroorganizmów. Ten sposób prezentacji wyników analizy z-nosa opatentowany został w USA przez Electronic Sensor Technology pod nazwą VaporPrint

Łatwo zauważyć tu olbrzymi potencjał zastosowań zarówno cywilnych jak i wojskowych. Pracuje się także nad połączeniem e-nosów z z-nosami (Sandia Lab.) w celu poprawy własności. Trzeba podkreślić, że niektóre z opracowanych pokryć są bardzo czułe. Przykładową tabelę czułości zamieszczono poniżej.

TABELA 4.2. PRZYKŁADY CZUŁOŚCI SENSORÓW Z SAW

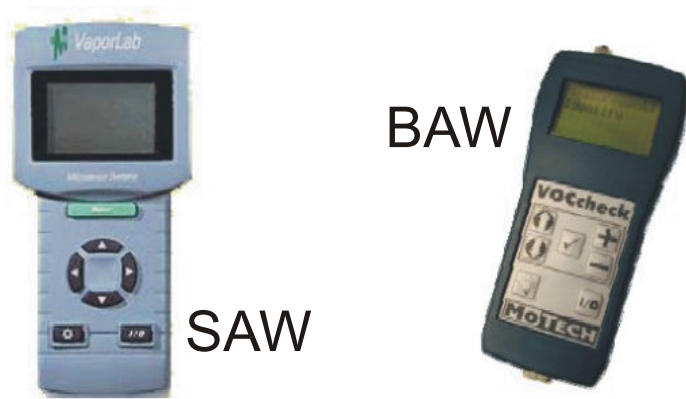
analit	poziom detekcji [ppb]	
	powietrze	woda
<b>Chloroform</b>	<b>45</b>	<b>0.65</b>
<i>Cis</i> 1,2 Dichloroethene	<b>47</b>	<b>1.7</b>
<b>Benzene</b>	<b>42</b>	<b>0.96</b>
<b>Carbon Tetrachloride</b>	<b>130</b>	<b>16.49</b>
<b>Trichloroethylene</b>	<b>6.3</b>	<b>0.40</b>
<b>Toluene</b>	<b>11</b>	<b>0.15</b>
<b>Tetrachloroethylene</b>	<b>5.7</b>	<b>0.57</b>
<b>Ethylbenzene</b>	<b>2.7</b>	<b>0.07</b>
<i>O</i> - Xylene	<b>2.5</b>	<b>0.11</b>
<b>1,1,2,2 Tetrachloroethane</b>	<b>3.6</b>	<b>0.56</b>

Z militarnego punktu widzenia najważniejsze zastosowania e-nosów i z-nosów mieszczą się w obszarach detekcji:

- substancji biologicznie czynnych,
- bojowych środków trujących,
- materiałów wybuchowych.

Wynika z tego, że dostatecznie czułe elektroniczne nosy byłyby bardzo dobrym narzędziem do ciągłego monitorowania miejsc narażonych na ataki terrorystyczne.

Trzeba tu podkreślić, że detekcja zapachów przy pomocy e-nosów jest bardzo szybka i stosunkowo tania. Przykład komercyjnych urządzeń (na razie jeszcze dość prymitywnych i mało czułych) prezentuje rys. 4.9.



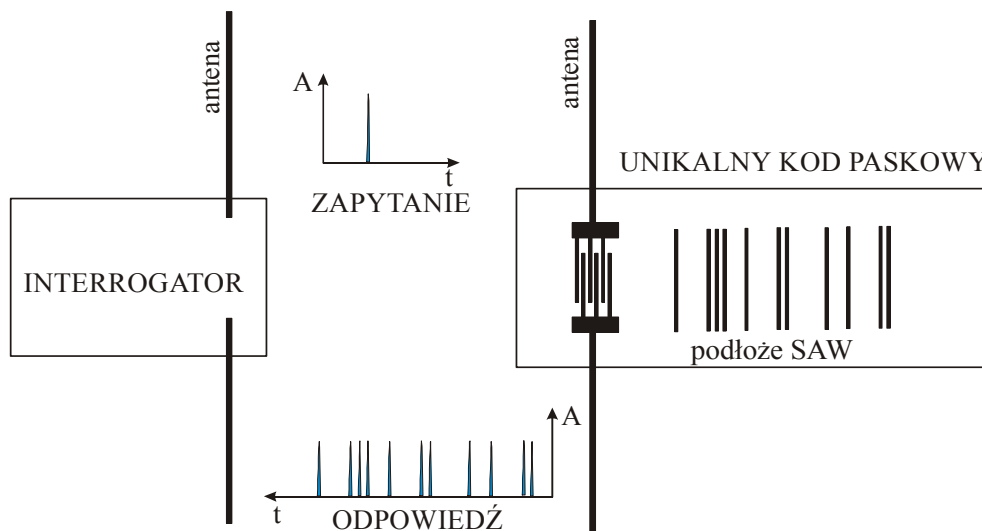
Rys. 4.9. Kieszonkowe laboratoria chemiczne

Prace nad takimi urządzeniami są już bardzo zaawansowane i prawdopodobnie w niedalekiej przyszłości będą one mogły się znaleźć na wyposażeniu od szczebla plutonu.



## 5. Zdalne czujniki z SAW

Sensory akustyczne z falą powierzchniową posiadają jeszcze tę zaletę, że mogą one pracować zdalnie. Czujnik z rys. 4.2. nie musi być fizycznie podłączony do urządzenia czytającego. Układ wyjaśniający zasadę działania zdalnego sensora z SAW przedstawiony jest na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Zdalny sensor z SAW

Elektromagnetyczny sygnał zapytania jest transmitowany drogą radiową w paśmie UHF/VHF przez stacjonarne urządzenie nadawczo-odbiorcze i następnie odbierany przez antenę podłączoną bezpośrednio do przetwornika międzypalczastego, którego zadaniem jest przetworzenie sygnału elektrycznego na SAW. Wygenerowana fala akustyczna propaguje się wzdłuż powierzchni natrafiając na unikalny układ rowków pracujących jako reflektory. Pewna część fali jest odbijana w każdym z tych reflektorów. Pakiety fal akustycznych, które po odbiciu powrócą do przetwornika zostaną powtórnie zamienione na sygnał elektryczny i wyemitowane w postaci fal radiowych. Jeśli układ pasków poddany jest określonemu oddziaływaniu fizycznemu (czujnik) to pod wpływem wielkości mierzonej nastąpi zmiana prędkości i fazy SAW. Z tego powodu odpowiedź układu zawierać będzie informacje nie tylko o liczbie i rozkładzie reflektorów, ale także o własnościach propagacyjnych podłoża zmienionych poprzez wielkością mierzoną. Wyodrębnienie pożądanej informacji, czyli określenie wielkości mierzonej jest zadaniem interrogatora. Ponieważ każdy z sensorów posiada własny kod staje się możliwe ich wielokanałowe odczytywanie – jednoczesne zdalne monitorowanie wielu miejsc. Sensory takie nie potrzebują zasilania i mogą być umieszczane w trudno dostępnych punktach,

obracających się elementach urządzeń, niebezpiecznych środowiskach, obszarach skażonych, instalacjach wysokonapięciowych, komorach próżniowych itd.

W chwili obecnej trwają prace w kierunku poprawy ich zasięgu, który jak do tej pory nie przekracza kilkudziesięciu metrów.

## Podsumowanie

Jak wnika z przedstawionego opracowania czujniki akustyczne mają bardzo wysoki potencjał aplikacyjny zarówno na obszarze cywilnym jak i wojskowym. Z tego też powodu prace w tej dziedzinie prowadzi się w czołowych ośrodkach naukowych na całym świecie. Można się o tym przekonać czytając roczne raporty najbardziej znaczących placówek badawczych (jak np. Massachusetts Institute of Technology, Naval Research Laboratory, Tokyo Institute of Technology). Duże zainteresowanie tą tematyką dało się też odczuć na ubiegłorocznej konferencji „IEEE Sensors”, gdzie zaprezentowano prace niemal wszystkich znaczących światowych ośrodków badawczych zarówno uczelnianych jak i przemysłowych. Pomimo pokaźnej liczby referatów związanych z czujnikami akustycznymi, na konferencji prezentowano, jak należy przypuszczać, tylko nieliczne prace z tej dziedziny, w większości są one bowiem niejawne i to nie tylko ze względu na znaczenie militarne ale także komercyjne. Prezentacjom bacznie przyglądali się też przedstawiciele takich koncernów jak Siemens czy Bosh.

W Polsce tematyką czujników akustycznych zajmują się głównie placówki uczelniane. Do najbardziej aktywnych należą: Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska, Politechnika Wrocławska, Uniwersytet A. Mickiewicza w Poznaniu, Uniwersytet Gdański, Wojskowa Akademia Techniczna oraz placówki samodzielne: Instytut Podstawowych Problemów Techniki i Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych. Należy nadmienić, że ta ostatnia posiada dość nowoczesną bazę technologiczną do wykonywania planarnych czujników akustycznych.

W wielu obszarach tej dziedziny (m. in. za wyjątkiem MEMS – brak bazy technologicznej) istnieje szansa na opracowanie nowych oryginalnych technik i urządzeń, które mogłyby stać się specjalnością polską. W niedległej przeszłości takie urządzenia czy techniki powstawały przecież w Polsce.

Jak się wydaje, jedynie brak zamówień stoi na przeszkodzie w rozpoczęciu szerszej zakrojonych prac w zakresie czujników akustycznych do zastosowań militarnych, a także w podjęciu w tym zakresie szerszej współpracy z zagranicznymi ośrodkami badawczymi.

Takie prace trwają, rozwija się też współpraca z ośrodkami zagranicznymi, niemniej skala przedsięwzięć w tych zakresach, ze względu na skromne finansowanie jest także skromna.

Z wojskowego punktu widzenia wydaje się, że priorytetem powinny być objęte dwa kierunki badań czujników akustycznych tj. rozwój czujników gazu z SAW (i ich zestawów tzn. elektronicznych nosów) oraz rozwój metod zdalnej detekcji i analizy sztucznych

źródeł dźwięku w wodzie, powietrzu i w gruncie. Rozwój tych specyficznych dziedzin będzie miał z całą pewnością znaczący wpływ na przebieg procesu rozpoznania, a także wzrost bezpieczeństwa pojedynczego żołnierza na polu walki (zdalna detekcja gazów bojowych, snajperów, min, pojazdów itd). Należy podkreślić, że kompleksowe rozpoznanie powinno uwzględniać wykorzystanie wszystkich rodzajów fal, w tym także fal akustycznych. W wielu przypadkach mogą one dostarczyć więcej informacji niż fale elektromagnetyczne, a przy konieczności prowadzenia rozpoznania w ośrodkach optycznie czy też radiowo nieprzeźroczystych są niezastąpione.