

3.1.9. — badania doświadczalne  
3.10.9. — emisja akustyczna

Zbigniew Ranachowski

POMIARY I ANALIZA

SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ

[PRACA HABILITACYJNA]

6/1996

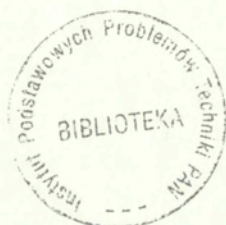
P.269 a



WARSZAWA 1996

<http://rcin.org.pl>

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 3 czerwca 1996 r.



56566



**Praca habilitacyjna**

recenzent – Prof. dr hab. Członek Rzecz. PAN Ignacy Malecki

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
Nakład 100 egz. Ark. wyd. 4,5 Ark. druk. 5,5  
Oddano do drukarni w czerwcu 1996 r.

---

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.  
Warszawa, ul. Jasna 1

## SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE.....	5
1. WPROWADZENIE.....	6
1.1. Przedmiot rozprawy .....	6
1.2. Rys historyczny metodyki pomiaru i obróbki sygnału emisji akustycznej ..	6
1.3. Rozwój aparatury do badań emisji akustycznej w Polsce.....	9
2. PODSTAWY TEORETYCZNE GENERACJI EMISJI AKUSTYCZNEJ I ŹRÓDŁA WZORCOWE.....	15
2.1. Generacja sygnału emisji akustycznej w ośrodku sprężystym .....	15
2.2. Generacja wzorcowych sygnałów emisji akustycznej.....	19
3. CHARAKTERYZOWANIE SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ PRZY POMOCY DESKRYPTORÓW.....	25
3.1. Wyznaczanie deskryptorów emisji akustycznej.....	25
3.2. Porównanie wartości deskryptorów dla sygnałów generowanych przez źródło impulsowe i szumowe.....	31
4. POMIARY I ANALIZA SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ W BADA- NIACH WŁASNOŚCI WYBRANYCH MATERIAŁÓW.....	33
4.1. Wyznaczanie naprężeń krytycznych w próbkach betonowych.....	33
4.2. Badania sygnału emisji akustycznej generowanego w próbkach z ceramiki.....	35
4.2.1. Omówienie procesu naświetlania laserowego przy użyciu mocy nie powodu- jącej powstania strefy przetapiania.....	39
4.2.2. Omówienie procesu naświetlania laserowego wywołującego powstawanie strefy przetapiania.....	42
4.3. Badania sygnału emisji akustycznej towarzyszącego procesowi termoobróbki blach.....	45
4.4. Pomiary Efektu Kaisera w belkach betonowych.....	48
4.5. Pomiary Efektu Felicity w elementach kompozytowych.....	50
4.6. Pomiary emisji akustycznej w trakcie prób ciśnieniowych zbiorników.....	52
5. IDENTYFIKACJA ŹRÓDEŁ SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ.....	57
5.1. Metody klasyfikacji sygnału emisji akustycznej.....	57
5.2. Klasyfikacja rzeczywistych źródeł emisji akustycznej z zastosowaniem sieci neuronowych.....	58
6. POMIARY I ANALIZA USZNYCH EMISJI AKUSTYCZNYCH.....	70
6.1 Mechanizm generacji usznych emisji akustycznych.....	70
6.2 Aparatura własna i pomiary usznych wywołanych emisji akustycznych, prowadzone przy współudziale autora.....	72
7. ZAKOŃCZENIE.....	77
8. LITERATURA.....	79



## POMIARY I ANALIZA SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ

### STRESZCZENIE

W niniejszej rozprawie autor przedstawił wyniki swoich ponad dziesięcioletnich prac związanych z doskonaleniem aparatury i metod badania emisji akustycznej (EA) wraz z omówieniem tendencji rozwojowych zachodzących w rozpatrywanej dziedzinie w ostatnich latach. W pierwszym Rozdziale pracy została przedstawiona ewolucja w dziedzinie obszarów zastosowań i stosowanej aparatury, jaka dokonała się w naszym kraju i na świecie od czasów pierwszych systematycznych pomiarów emisji akustycznej dokonanych w 1933 roku. Drugi Rozdział zawiera podstawy teoretyczne zagadnień generacji i propagacji sygnału emisji akustycznej w ciele stałym łącznie z przedstawieniem eksperymentalnych układów modelowych, pozwalających na pomiar sygnału EA w kontrolowanych warunkach i uproszczonej w stosunku do warunków rzeczywistych konfiguracji ośrodka propagacji sygnału. W Rozdziale drugim dokonano również przeglądu prac poświęconych teorii sygnału EA. W kolejnym Rozdziale zostały opisane podstawy wyznaczania deskryptorów - parametrów charakteryzujących skalarnie i wektorowo rejestrowane próbki sygnału EA.

Następną grupą zagadnień, opisaną w Rozdziale 4., są wyniki prowadzonych przez autora pracy badań sygnału EA, związanych z oceną własności mechanicznych wybranych materiałów i obiektów. W omawianym Rozdziale prezentowane są zależności wybranych deskryptorów EA od czasu. Celem przedstawienia różnych procedur rejestracji i analizy danych eksperymentalnych było w tym wypadku ukazanie przydatności stosowania metody EA w zastosowaniach praktycznych.

W następnej kolejności zostały opisane przykłady zastosowania opracowanej przez autora procedury identyfikacji rzeczywistych źródeł EA, z wykorzystaniem metody sieci neuronowych.

Ostatnią grupę tematyczną stanowi problematyka usznej emisji akustycznej - sygnału traktowanego jako pokrewny emisji akustycznej, chociaż różniącego się od niej ośrodkiem propagacji i metodami obróbki.

## I. WPROWADZENIE

### 1.1. Przedmiot rozprawy

Terminem emisja akustyczna (EA) przyjęło się w międzynarodowej terminologii określać zjawisko generacji i propagacji fal sprężystych w różnych ośrodkach stałych i cieczech. Źródłem tych fal są zarówno procesy rozwoju mikropęknięć, generacja i anihilacja dyslokacji lub wzajemne przemieszczanie się fragmentów badanego ośrodka połączone z tarciem. Metoda EA jest obecnie szeroko stosowana w badaniach własności mechanicznych oraz przemian fazowych, zachodzących w badanych ośrodkach. Zalety wyróżniające omawianą metodę na tle innych metod służących wyznaczaniu własności fizykoczemicznych ciał stałych i cieczy wynikają z podstawowej zasady pomiaru emisji akustycznej. Źródłem rejestrowanego sygnału jest w tym przypadku energia generowana przez niejednorodności badanego ośrodka w wyniku wywołanej z zewnątrz stymulacji. Aparatura do pomiaru EA pozwala na wykrywanie różnorodnych nieciągłości i wad materiałowych w całej objętości badanego elementu, przy zastosowaniu sensorów o niewielkich wymiarach i przy niskich poziomach obciążenia mechanicznego badanej struktury. Różnicą pomiędzy klasycznymi sygnałami akustycznymi a emisją akustyczną jest znacznie szersze pasmo częstotliwości tej ostatniej - od kilku do około tysiąca kiloherców. Rejestracja i obróbka sygnałów z tak szerokiego przedziału częstotliwości narzuca wysokie wymagania stosowanej aparaturze i metodom badawczym.

Przedmiotem niniejszej rozprawy jest analiza sygnału EA generowanego przez różne obiekty. Przedstawione zostaną metody pomiarowe w powiązaniu z aparaturą opracowaną przez autora w celu optymalnego wyznaczania parametrów struktury badanych ośrodków. We Wprowadzeniu zostanie zamieszczone omówienie procesów rozwojowych z dziedziny doskonalenia metodyki pomiaru i analizy sygnału EA. W dalszej kolejności zostaną omówione najczęściej stosowane modele źródeł EA i sygnały pochodzące ze źródeł wzorcowych. Analiza sygnału EA powiązana zostanie następnie z deskryptorami wyznaczanymi w dziedzinie czasu i częstotliwości. Jako przyczynek do rozważań dotyczących dalszego rozwoju opisywanych technik posłużą zaawansowane metody identyfikacji źródeł EA - metoda *rozpoznawania wzorca (pattern recognition)* i intensywnie rozwijana w ostatnich latach metoda *obliczeń neuronowych*.

### 1.2 Rys historyczny metodyki pomiaru i obróbki sygnału EA

Mając na uwadze fakt iż w trakcie trwającej pięćdziesiąt lat historii systematycznych badań metodą EA uczestniczyło w nich kilkaset ośrodków badawczych, w niniejszym paragrafie przedstawione zostaną jedynie zagadnienia dotyczące rozwoju procedur pomiarowych i obróbki sygnału EA, powiązane z materiałem zamieszczonym w dalszej części pracy. Szersze omówienie ewolucji metody EA zawiera praca zbiorowa pod redakcją I. Maleckiego i J. Ranachowskiego [54] oraz publikacje anglojęzyczne [19, 23].



Pierwsze konstrukcje aparatury do rejestracji sygnału EA powstały w latach trzydziestych. W artykule [20] zamieszczono opis urządzenia skonstruowanego w 1933 roku przez F.Kishinouye. Aparat służył do rejestracji sygnału EA generowanego w procesie zginania próbek drewnianych. Jako przetwornik sygnału zastosowano elektrodynamiczną wkładkę gramofonową. Sygnał z przetwornika, po kilkudziesięciokrotnym wzmocnieniu w urządzeniu lampowym był rejestrowany na błonie światłoczułej. Zarejestrowane sygnały były poddawane jedynie analizie jakościowej (obserwacja zmian natężenia w funkcji czasu) w celu znalezienia analogii ze zjawiskami sejsmicznymi. Przy pomocy zbliżonej aparatury, t.j. przetwornika elektrodynamicznego, wzmacniacza lampowego i piszącego galwanometru świetlnego F.Foster i E.Scheil rejestrowali sygnały EA towarzyszące przemianie austenit - martenzyt w stali [26]. W tym przypadku zapis natężenia sygnału EA w funkcji czasu służył do wykrycia początku badanej przemiany fazowej.

W następnej dekadzie do badań sygnałów EA zastosowano aparaturę o znacznie podwyższonej czułości (wzmocnienie powyżej 60 dB) i paśmie rejestrowanego sygnału zbliżonym do 1 MHz. Było to możliwe dzięki zastosowaniu jako sensorów przetworników wykonanych z kwarcu i z ceramiki piezoelektrycznej. Umożliwiło to rejestrację sygnału EA generowanego przez procesy związane z ruchem dyslokacji w kryształach cyny [55] i kadmu [57].

W 1952 roku procedura badawcza z zastosowaniem EA została w sposób sformalizowany opisana w zastrzeżeniu patentowym J. Kaisera (patent niemiecki nr 852 771). W wymienionym opisie została powtórzona teza pracy doktorskiej autora [44], iż częstotliwość, amplituda oraz liczba sygnałów dźwiękowych zarejestrowanych w obciążonej mechanicznie próbce ciała stałego są związane z historią obciążania próbki i jej własnościami fizykochemicznymi. Badania zmian natężenia sygnału EA i częstotliwości dominujących w tym sygnale generowanym w obciążanych mechanicznie próbkach drewna i metali wykonane przez Kaisera uważa się za początek okresu intensywnego wykorzystywania omawianej metody. Autor ten wprowadził również dyskutowane w drugim rozdziale niniejszej pracy rozróżnienie między dyskretnymi i ciągłymi sygnałami EA i opisał omawiany dalej w niniejszej pracy nieodwracalny efekt materiałowy, powszechnie nazywany jego nazwiskiem.

Rozwój technik raketowych w końcu lat pięćdziesiątych wywarł wpływ na powstawanie coraz bardziej złożonej aparatury EA, wykorzystywanej w badaniach wytrzymałościowych. Zespół pod kierunkiem A.T. Greena przeprowadził pierwsze eksperymenty z wielokanałowym zapisem sygnałów EA podczas badań obudów silników pocisków Polaris w zakładach Aerojet w 1961 roku [19]. W badaniach tych stosowano piezoelektryczne akcelerometry, przedwzmacniacze ładunkowe, taśmowe rejestratory sygnału w paśmie akustycznym i precyzyjne analizatory mocy rejestrowanego sygnału. Umożliwiło to wykrywanie metodą lokacji przestrzennej uszkodzeń w konstrukcji z rozdzielczością liniową 30 cm w obiekcie o średnicy 6 metrów w trakcie próby hydrostatycznej.

Kolejne udoskonalenia metodyki pomiaru EA przypisywane są H. Dunneganowi [21], któremu w znaczący sposób udało się podwyższyć czułość aparatury EA poprzez eliminację z sygnału składowych niskoczęstotliwościowych. Składowe te, charakteryzujące się amplitudą często przewyższającą sygnał użyteczny, pochodzą z

otoczenia badanego obiektu. W połowie lat sześćdziesiątych zastosował on w konstruowanej przez siebie aparaturze aktywne filtry górnoprzepustowe. Do wielokanałowej rejestracji sygnału EA stosowano w tym czasie rejestratory magnetyczne o paśmie użytecznym 30 - 150 kHz i perforowaną taśmę papierową. W 1969 r. Dunnegan założył Dunnegan Research Laboratory, przekształcone później w firmę Dunnegan Endevo. Była to pierwsza firma produkująca aparaturę do pomiaru EA, która istnieje do dzisiaj jako międzynarodowa korporacja i wytwarza większość aparatury eksploatowanej na świecie.

Rozwój modelu matematycznego EA, szerzej przedstawiony w następnym Rozdziale, został zapoczątkowany w latach pięćdziesiątych. Przetworniki EA rejestrują składową normalną fal sprężystych na powierzchni granicznej w badanym obiekcie, dlatego znalazły zastosowanie prace Ewinga (1954), [24] i Knopoffa (1957), [48], dotyczące szczególnych przypadków rozwiązań równań elastodynamiki dla źródeł punktowych. Rozwiązania te dotyczyły składowej normalnej wektora przemieszczeń na granicy ośrodka płytowego. Rozwinięto teorię promieni (1976) [15, 67], w której każda z dróg propagacji sygnału EA od źródła do punktu obserwacji opisana jest jako odrębny czynnik równań elastodynamiki. Wpływ rodzaju ośrodka i sposobu jego obciążania na charakterystykę czasową i widmową rejestrowanego sygnału EA opisywali m.in. Dunnegan [22], Stephens [90] i Pao [16].

Zachodził również postęp w projektowaniu przetworników do rejestracji sygnału. Początkowo stosowane przetworniki piezoelektryczne o charakterystyce rezonansowej pozwalały na detekcję przemieszczeń rzędu  $10^{-10}$  -  $10^{-13}$  m. Pasma odbieranych częstotliwości dla 10 dB spadku amplitudy sygnału nie przekraczało jednak 20 % częstotliwości rezonansowej (ok. 100 kHz dla częstotliwości środkowej 500 kHz). Stanowiło to niewielką część użytecznego spektrum sygnału. Do rejestracji EA w szerszym paśmie stosowano mechaniczne i elektryczne wytlumianie przetworników, redukując ich czułość i wprowadzając znaczne nierównomierności charakterystyki częstotliwościowej, co pokazano w [50]. Na początku lat osiemdziesiątych opracowano przetworniki szerokopasmowe nowej generacji [70]. Wykorzystano w nich teoretycznie obliczony, optymalny kształt elementu piezoelektrycznego (ścięty stożek o kilkumilimetrowej mniejszej podstawie). Nieliniowość charakterystyki częstotliwościowej w paśmie 100 - 1000 kHz nie przekraczała dla tych konstrukcji +/- 5% maksymalnej wartości sygnału. Zastosowanie tych przetworników pozwoliło na praktyczne zastosowanie opisanych w dalszych Rozdziałach procedur identyfikacji i lokacji źródeł sygnału.

Aparatura do pomiarów EA produkowana w latach osiemdziesiątych umożliwiała precyzyjne i wielokanałowe pomiary sygnału EA, co zostało szerzej omówione przez autora w Rozdziale "Aparatura Pomiarowa" pracy [54]. W typowej konfiguracji aparatury występują obecnie następujące bloki funkcjonalne:

- przetworniki pomiarowe,
- generatory sygnałów kalibrujących tor odbiorczy,
- niskoszumne przedwzmacniacze ładunkowe (szum o wartości skutecznej 1 - 3  $\mu$ V w paśmie 2 MHz),
- filtry górnoprzepustowe (dolna częstotliwość graniczna 25 lub 50 kHz),



- procesory sygnału wyznaczające wybrane deskryptory EA (opisane w trzecim Rozdziale niniejszej rozprawy),
- procesory sygnału wyznaczające współrzędne źródeł EA,
- skomputeryzowane bloki wizualizacji i rejestracji sygnału EA.

Współczesne analizatory EA są eksploatowane w różnorodnych warunkach badawczych. Monitorują w sposób ciągły stan obiektów takich jak : samoloty, pojazdy trakcyjne, elektrownie, zbiorniki, tory przesyłowe wysokiego napięcia, wyrobiska kopalniane, konstrukcje stalowe, w tym morskie platformy wiertnicze.

Przykładem zaawansowanego analizatora EA jest "stacja robocza" Locan 320/420 produkcji amerykańskiej firmy Physical Acoustic Corporation. Każdy z 14 kanałów pomiarowych urządzenia wyposażony jest w układ wstępnej obróbki sygnału. Sygnał EA w formie cyfrowej jest przesyłany do procesora centralnego za pomocą szybkiej magistrali Multibus ( IEEE 796 ). Procesor centralny jest zbudowany w oparciu o przenośny komputer typu IBM PC, sprzężony z rejestratorem impulsów (transient recorderem), który rejestruje wybrane fragmenty sygnału EA. Aparatura wyposażona jest w wielowariantowy system obróbki danych, umożliwiający autokalibrację systemu, lokację źródeł EA oraz generowanie alarmu w przypadku przekroczenia krytycznych wartości przez sygnał EA w monitorowanym obiekcie. Stopień złożoności opisanego analizatora rzutuje na wysoką cenę aparatu. Krajowe laboratoria badawcze, często badające niewielkie obiekty nie wymagające dużej liczby torów pomiarowych nie przejawiają zainteresowania pozyskaniem aparatury zbliżonej do opisanej wyżej. Kilkadziesiąt urządzeń do pomiaru EA pracujących w Polsce ma uproszczoną konstrukcję, szerzej opisaną w następnym paragrafie.

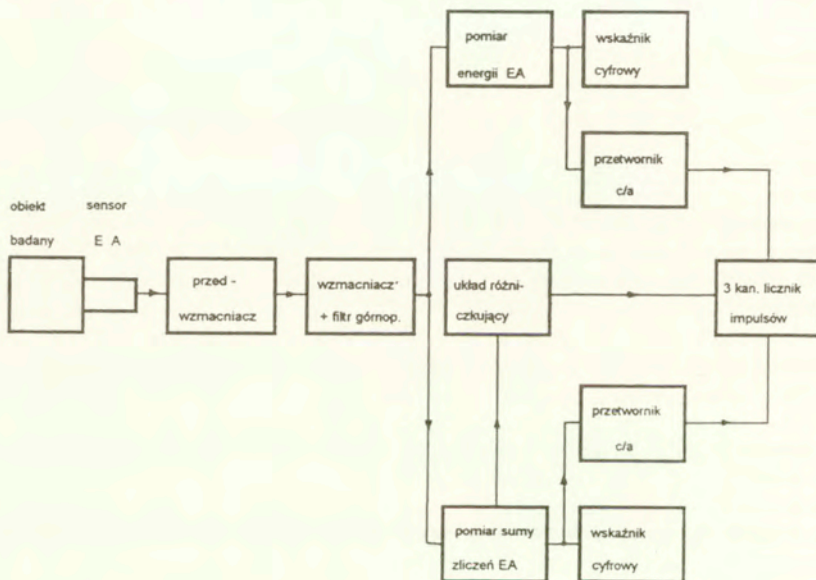
### 1.3 Rozwój aparatury do badań EA w Polsce

Najwcześniejsze krajowe publikacje związane z EA dotyczą badań zmęczenia oraz przemian fazowych w stali i pochodzą z początku lat siedemdziesiątych [45,30,41]. Badania te prowadzono w IPPT przy użyciu francuskiego analizatora EA typu Audimat P firmy Leanord. Przyrząd posiadał jeden kanał pomiarowy i był zbudowany w technice układów scalonych małej integracji. Tor pomiarowy urządzenia składał się z rezonansowego przetwornika piezoelektrycznego, przedwzmacniacza i wzmacniacza głównego z filtrem górnoprzepustowym. Przyrząd rejestrował podstawowy deskryptor sygnału EA - tempo / sumę zliczeń. Deskryptor ten charakteryzuje liczbę przekroczeń przez sygnał umownego poziomu napięciowego - wszystkie deskryptory używane w technice pomiaru EA zostaną omówione w Rozdziale 3. Impulsy generowane w analizatorze w trakcie rejestracji zliczeń EA służyły do sterowania rejestratorem X-Y lub drukarką wierszową. Sposób rejestracji deskryptora sygnału EA pozwalał jedynie na przeprowadzenie do dziesięciu cykli pomiarowych na sekundę. Zbliżone pod względem budowy urządzenie amerykańskie Acoustic Emission Processor 201 firmy Acoustic Emission Corporation używano od połowy lat siedemdziesiątych w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Drugi z opisywanych aparatów umożliwiał dodatkowo rejestrację wartości skutecznej mierzonego



sygnału EA. Był wykorzystywany przy próbach wytrzymałościowych. Badania elementów betonowych z zastosowaniem tego aparatu są opisane w pracach [39, 40].

W 1979 roku w Zakładzie Akustyki Fizycznej IPPT zespół pod kierunkiem W. Mikiela skonstruował jednokanałowy analizator EA, przeznaczony do badania procesu pęknięcia materiałów kruchych, ANEMA 79/80 [74]. Aparat jest pokazany na Rys. 1. Oryginalnym rozwiązaniem, zastosowanym w powyższym urządzeniu było przesyłanie wzmacnionego i poddanego filtracji górnoprzepustowej sygnału do trzech torów pomiarowych, wyznaczających trzy deskryptory EA : energię sygnału, tempo i sumę zdarzeń. Do rejestracji mierzonych parametrów zastosowano medyczny rejestrator sygnałów EKG z taśmą termoczułą. Umożliwiło to uzyskanie dziesięciokrotnie wyższej prędkości zapisu w porównaniu z tradycyjnymi tuszowymi rejestratorami X-T. Parametry procesorów sygnału zostały dobrane eksperymentalnie w ten sposób, aby urządzenie pozwalało zarejestrować początkową fazę rozwoju niskoenergetycznych pęknięć w obciążonych próbkach ceramicznych przy pomocy monitora tempa zliczeń i przy przeznaczeniu pozostałych torów do rejestracji sygnałów o wyższej energii. Urządzenie było wykorzystywane do wyznaczania prędkości wydłużania pęknięcia podkrytycznego metodą podwójnego skręcania. Sygnał z analizatora EA informujący o rozpoczęciu procesu rozwoju pęknięcia podkrytycznego służył do sterowania układem mechanicznym, obciążającym próbkę .



Rys. 1. Schemat blokowy analizatora emisji akustycznej ANEMA 79/80 (wg. [74])

W latach 1980 - 1981 zbudowano również kilka egzemplarzy dwukanalowej aparatury do pomiaru EA w Instytucie Badań Jądrowych w Świerku o nazwie E1 [69]. Urządzenie to powstało przy zastosowaniu bloków cyfrowych systemu Camac, produkcji Zjednoczonych Zakładów Urządzeń Jądrowych Polon i umożliwilo pomiar gęstości zliczeń i energii sygnału EA w dwóch kanałach. Minikomputer wchodzący w skład tego urządzenia umożliwiał wstępną obróbkę mierzonych parametrów - jeden z opracowanych programów obliczał przesunięcie czasowe pomiędzy początkiem sygnałów rejestrowanych w torach pomiarowych. Wartości mierzonych deskryptorów były zapamiętywane w wewnętrznej pamięci o pojemności 2000 słów i następnie rejestrowane na drukarce wierszowej. Opisane urządzenie było stosowane do badań wytrzymałościowych w Centralnym Ośrodku Badań Kolejnictwa. Przyjęte w nim rozwiązania techniczne nie zostały zastosowane w szerszej skali, ponieważ aparatura charakteryzowała się dużymi wymiarami i wysoką ceną.

W 1983 roku w Zakładzie Doświadczalnym IPPT zespół pod kierunkiem E. Adanczyka, przy udziale autora pracy, opracował analizator akustyczny DEMA 10. Parametry techniczne tego urządzenia były korygowane w trakcie serii pomiarów sygnałów EA towarzyszących korozji naprężeniowej, wykonywanych w Instytucie Lotnictwa [1]. Schemat blokowy tego urządzenia jest przedstawiony na Rys. 2. Do pomiaru sygnału EA zaprojektowano oryginalne głowice o wymiennych wkładkach piezoelektrycznych z częstotliwościami rezonansowymi: 100, 200, 500, 800 i 1000 kHz. Aparatura posiadała możliwość pomiaru za pomocą głównego i dodatkowego, uproszczonego toru pomiarowego. Do analogowego pisaka X - T transmitowane były dwa z następujących czterech deskryptorów sygnału EA:

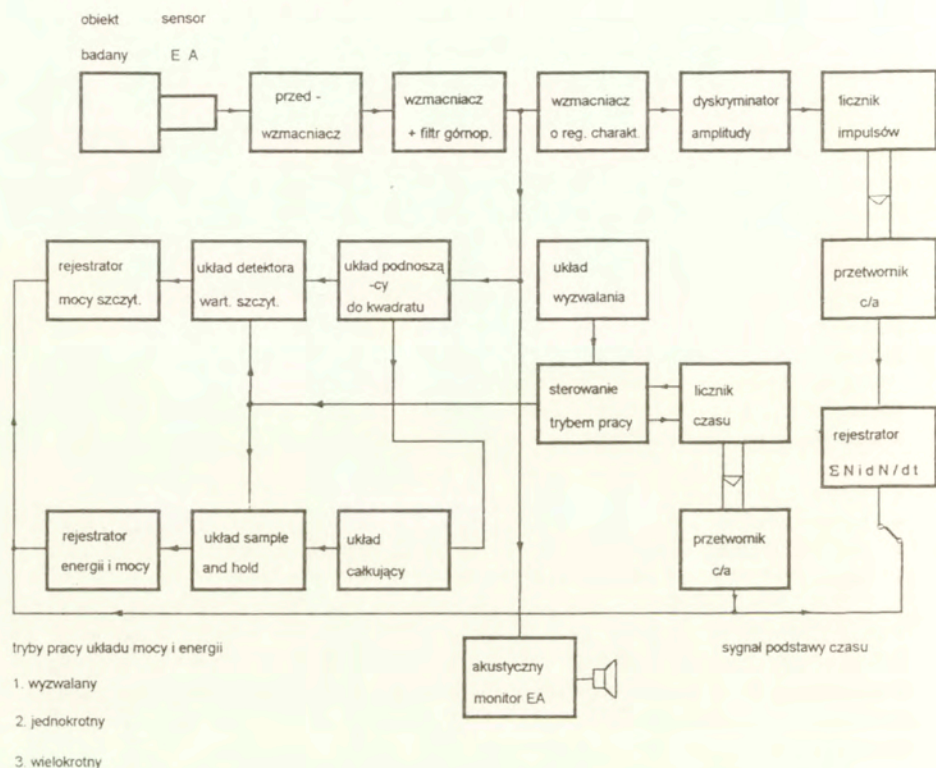
- t<sub>mpa</sub> zliczeń,
- s<sub>mpy</sub> zliczeń,
- wartości szczytowej mocy sygnału,
- wartości chwilowej energii sygnału.

Pomary mogły być prowadzone z prędkością 10 lub 1 na sekundę albo jeden co kilkadziesiąt sekund. Istniała możliwość transmisji wyników do systemów komputerowych w postaci cyfrowej. W ramach prowadzonego ówczesnie programu badawczo - rozwojowego "Aparatura" wyprodukowano i przekazano jednostkom badawczym kilkanaście zestawów analizatora DEMA 10.

Przy współpracy autora z zespołem badawczym z Politechniki Śląskiej pod kierunkiem prof. A. Opilskiego dokonano adaptacji aparatury EA do pomiarów próbek węgla kamiennego. Charakterystyki widmowe sygnału EA generowanego w procesie obciążania mechanicznego tego materiału zamieszczono w [65]. Do celów dalszych badań *in situ* w 1985 roku autor opracował i opatentował aparaturę do pomiaru EA w góroworze, opisane w [66]. Ze względu na trudne warunki środowiskowe urządzenie monowane w kopalni było umieszczane w pyłoszczelnych i iskrobezpiecznych obudowach systemu do pomiarów geofonowych TSA NA produkcji Zakładu Elektroniki Górnictwa. Jako przetwornik sygnału EA pracował układ przetworników piezoelektrycznych typu sandwich dużej średnicy (25 mm) i częstotliwości rezonansowej



50 kHz. Przetwornik był sprzężony akustycznie z falowodem prętowym o długości 1 m, umieszczanym w badanej strukturze geologicznej poza strefą spękań powierzchniowych. Urządzenie umieszczone w wyrobisku kopalnianym w pobliżu sensora EA przetwarzało tempo zdarzeń sygnału na zmiany natężenia prądu, transmitowane na powierzchnię za pomocą linii telefonicznej. W trakcie eksploatacji trzech opisanych wyżej aparatów zarejestrowano szereg sygnałów związanych ze zmianami naprężeń w górotworze i określono przybliżony zasięg odbieranych sygnałów na 100 m.



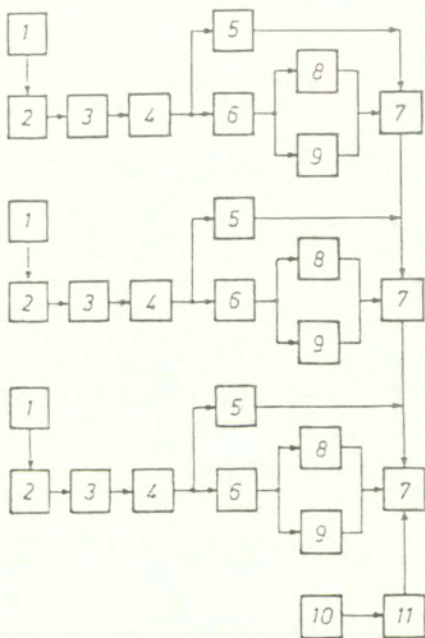
Rys. 2. Schemat blokowy analizatora EA DEMA - 10

W tym samym okresie w IPPT opracowano wielokanałową aparaturę EA do zastosowań w kopalniach typu ENIGOR [43]. Aparatura ta była wyposażona w piezoelektryczne sensory EA, pracujące w niskoczęstotliwościowym paśmie sygnału 200 Hz do 5 kHz i umożliwiała pomiary następujących parametrów w interwałach 1 s i 10 s :

- tempa zdarzeń EA.
- sumy zdarzeń EA.
- sumy kwadratów amplitud sygnału EA.

Transmisja sygnałów użytecznych na powierzchnię odbywała się za pomocą linii telefonicznej z kodowaniem w postaci modulacji FM. Analiza danych pomiarowych, w tym lokacja źródeł EA na podstawie maksymalnego natężenia sygnału była przeprowadzana na powierzchni za pomocą komputera.

W końcu lat osiemdziesiątych w Polsce znacznie wzrosło zainteresowanie pomiarami metodą emisji akustycznej. Przy udziale autora w IPPT powstał nowy model analizatora przystosowany do współpracy z komputerem IBM PC [75]. Aparat umożliwia pomiar tempa zliczeń lub zdarzeń EA, wartości skutecznej mierzonego sygnału i parametru, określającego poziom obciążenia próbki. Jednolity interfejs komputerowy zainstalowany w czterdziestu egzemplarzach tego urządzenia stał się czynnikiem stymulującym powstanie szeregu programów do analizy rejestrowanych danych. Trzykanałowa wersja tego urządzenia została wyposażona w moduł lokacji dwuwymiarowej źródła sygnału. Schemat blokowy tej wersji pokazano na Rys. 3.



Rys. 3 Schemat blokowy 3-kanalowego analizatora emisji akustycznej, zaprojektowanego przez autora rozprawy. 1 - przetwornik sygnałów EA, 2 - przedwzmacniacz, 3 - filtr górnoprzepustowy, 4 - wzmacniacz, 5 - przetwornik wartości skutecznej, 6 - procesor zliczeń EA, 7 - interfejs do komputera, 8 - moduł lokacji źródła sygnału, 9 - licznik impulsów, 10 - układ wzmacniacza zewnętrznego sygnału analogowego, 11 - przetwornik analogowo - cyfrowy



W latach 1993 - 1995 autor rozprawy dokonał dalszych modyfikacji aparatury w celu zwiększenia liczby rejestrowanych parametrów EA i podniesienia czułości toru pomiarowego. Częstotliwość cykli pomiarowych została zwiększona do 250 na sekundę, a obróbkę sygnału uzupełniono o rejestrację wartości szczytowej mierzonych impulsów. Zrealizowano także możliwość rejestracji próbek źródłowego sygnału EA poprzez zastosowanie w torze pomiarowym szybkiego przetwornika cyfrowo - analogowego i bufora pamięciowego. Rejestracja źródłowego sygnału EA odbywa się w sposób następujący. Przetwornik analogowo - cyfrowy jest uruchamiany w chwili zarejestrowania zdarzenia EA przez układ dyskryminatora analizatora EA. W tym momencie zostaje zapisane w dodatkowym module pamięciowym 2000 bajtów sygnału, próbkowanego z częstotliwością 2,5 lub 5 MHz. Cyfrowa próbka sygnału jest przesyłana do pamięci operacyjnej komputera razem z innymi parametrami, generowanymi przez bloki funkcjonalne analizatora EA.

Ponadto powstała również sześciokanałowa wersja opisywanej aparatury, przeznaczona do badania zbiorników ciśnieniowych i transformatorów energetycznych. Tendencje rozwojowe dotyczące analizatorów EA zostaną opisane w ostatnim Rozdziale niniejszej rozprawy.

## 2. PODSTAWY TEORETYCZNE GENERACJI EMISJI AKUSTYCZNEJ I ŹRÓDŁA WZORCOWE

### 2.1 Generacja sygnału EA w ośrodku sprężystym

Źródłem sygnału EA jest lokalna zmiana pola naprężeń w materiale. W ośrodku sprężystym i izotropowym generacja sygnału EA może być przedstawiona za pomocą równania falowego [53]:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{u} + \mu \text{div grad } \mathbf{u} \quad (1)$$

gdzie  $\rho$  - gęstość ośrodka,

$\mathbf{u}$  - wektor przemieszczeń,

$\lambda, \mu$  - stałe Lamé, charakteryzujące ośrodek.

Opisywane równaniem (1) fale sprężyste, propagujące się w ośrodku podlegają wielokrotnym odbiciom i transformacjom na powierzchniach granicznych. Dlatego analityczne rozwiązanie zagadnień elastodynamicznych nawet dla oproszczonej geometrii ośrodka, jakim jest przyjęcie jego jako nieograniczonej płyty o skończonej grubości, jest bardzo złożone. Podstawowy wywód matematyczny wraz z obszernym przeglądem literatury na powyższy temat Meissner oraz autor rozprawy zamieścili w [56]. W stosowanym obecnie modelu propagacji sygnału EA [90], [16] przemieszczenie powierzchni ośrodka, rejestrowane przez sensor EA jest powiązane z funkcją źródła EA oraz funkcją reprezentującą transformację sygnału EA w ośrodku. Uwzględniając impulsowy charakter źródła EA, składowe wektora przemieszczenia  $u_i$ , rejestrowane przez sensor można opisać równaniem [14]:

$$u_i(t') = G_{ij}(r', t' - t; r) f_j(t) \quad (2)$$

gdzie  $G_{ij}(r', t' - t; r)$  jest funkcją Greena dla przemieszczenia w kierunkach  $x'_i, y'_i, z'_i$  w punkcie  $r'$  w chwili  $t'$  w przypadku, gdy źródłem tych przemieszczeń jest lokalne zaburzenie  $f_j$  pola naprężeń w punkcie  $r$  w chwili  $t$ .

Funkcja amplitudy zmian pola naprężeń  $f^*$  może być przyjmowana jako [97]:

A : funkcja Heaviside'a :

$$f^*_{,A} = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < 0 \\ 1 & \text{dla } t \geq 0 \end{cases}$$



B : funkcja liniowo - narastająca z parametrem  $\tau$ , nazywanym dynamicznym czasem narastania :

$$f^*_{B} = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < 0 \\ t / 4\tau & \text{dla } 0 \leq t < 4\tau \\ 1 & \text{dla } t > 4\tau \end{cases}$$

C : funkcja narastająca według wzoru Gaussa

$$f^*_{C} = K \operatorname{erf} \left\{ (t / \tau) + 1 \right\}$$

gdzie:  $\operatorname{erf}(x) = \int_0^x \exp(-y^2) dy$

W praktycznych rozwiązaniach równań elastodynamiki przyjmuje się przybliżenie pola dalekiego, co jest zwykle spełnione wobec niewielkich rozmiarów źródeł EA i rejestrowanych fal sprężystych o długościach centymetrowych. W tym przypadku równanie (2) przybiera postać (dla  $f^*_{A}$ ) :

$$G(x', t' - t; x) = \frac{1}{4\pi\rho v_p^2} \gamma_i \gamma_j \frac{1}{r} \delta(t' - t - r / v_p) - \frac{1}{4\pi\rho v_s^2} (\gamma_i \gamma_j - \delta_{ij}) \frac{1}{r} \delta(t' - t - r / v_s) \quad (3)$$

gdzie :  $v_p$  - prędkość fali dylatacyjnej,

$v_s$  - prędkość fali ścinania,

$\gamma_i, \gamma_j - i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$  kosinusy kierunkowe źródło - odbiornik oraz odbiornik źródło według notacji użytej we wzorze (2)

$r$  - odległość pomiędzy źródłem EA a sensorem,

$\delta_{ij}$  - delta Kroneckera,

$\delta(x)$  - funkcja delta, równa  $+\infty$  dla  $x = 0$  oraz równa 0 dla pozostałych wartości  $x$ .

Równanie (3) jest słuszne jedynie wtedy, gdy fala sprężysta generowana przez źródło EA osiągnie sensor EA, znajdujący się na powierzchni swobodnej ośrodka, bez przekraczania powierzchni nieciągłości w ośrodku i nie podlegając odbiciu. Sensor EA rejestruje jedynie składową normalną wektora przemieszczeń, występującą na powierzchni swobodnej. Ponieważ na tej powierzchni padające fale sprężyste podlegają odbiciom i transformacjom, wprowadza się pojęcie *funkcji odbiornika*, która uwzględnia zależność składowej normalnej  $U_z'$  od kąta padania fali pochodzącej od źródła EA. Składową tę można przedstawić jako iloczyn amplitudy fali dylatacyjnej na powierzchni swobodnej w punkcie umieszczenia sensora  $U_0$  i funkcji odbiornika.

Przy założeniu jako modelu źródła EA źródła punktowego, reprezentowanego przez parę sił lub układ sił skupionych, w pracy [58] podano pięć uproszczonych wyrażeń, opisujących charakterystyki kierunkowe różnych typów źródeł EA. Na podkreślenie zasługuje fakt, że współczesna wielokanałowa aparatura pomiarowa umożliwia identyfikację rodzaju źródła EA przy wykorzystaniu tych wyrażeń przez porównanie amplitud sygnału EA, zmierzonego za pomocą układu sensorów EA umieszczonych pod różnymi kątami wokół strefy generacji sygnału.

Podane niżej charakterystyki kierunkowe modelowych źródeł EA zostały opracowane zgodnie z następującymi założeniami : a) źródłem EA jest układ sił skupionych - para sił z

zerowym lub niezerowym momentem lub układ par sił, b) charakterystykę kierunkową promieniowania źródła EA podaje się jako funkcję kąta  $R(\theta)$ , określonego między płaszczyzną XY, a linią źródło EA - sensor. Położenie płaszczyzny działania sił skupionych wynika z konfiguracji sił zewnętrznych, obciążających badany ośrodek.

I. Dylatacyjne źródło EA występuje w ośrodku z wtrąceniem, powodującym lokalną anizotropię, gdy ośrodek poddany jest regularnemu, w stosunku do trzech głównych osi obciążeniu mechanicznemu lub termosprężystemu. Siły skupione w źródle EA mają wartość jednakową we wszystkich kierunkach i dlatego  $R_I(\theta) = 1$ .

II. Dipolowe źródło EA jest związane z anizotropią wyróżnionym kierunku ośrodka.

W źródle EA działa pojedyncza siła wzdłuż osi Z. W tym przypadku [14]:

$$R_{II}(\theta) = \cos^2(\theta) \quad (4)$$

III. Źródłem EA w postaci pary sił działających wzdłuż osi Z można opisać przypadek, gdy w chwili przerwania wiązania pomiędzy płaszczyznami pęknięcia, brzegi pęknięcia oddzielają się. Przy założeniu, że szczelina leży w płaszczyźnie XY, w kierunku sensora obserwuje się działanie jednej z pary sił rozrywającej szczelinę. Miller i Pursey [58] podaje dla tego przypadku następującą postać charakterystyki kierunkowej źródła EA:

$$R_{III}(\theta) = \frac{2k^2(k^2 - 2\sin^2\theta)(1 - \sin^2\theta)^{0.5}}{(k^2 - 2\sin^2\theta)^2 + 4\sin^2\theta(1 - \sin^2\theta)^{0.5}(k^2 - \sin^2\theta)^{0.5}} \quad (5)$$

gdzie:  $k$  - stosunek prędkości fali dylatacyjnej do prędkości fali ścinania.

IV Istnieją cztery przypadki źródeł EA, w których występują pary sił z momentem ścinającym. Kąt nachylenia płaszczyzny, w której pojawiają się naprężenia ścinające do płaszczyzny XY oznacza się jako  $\Psi$ . Konfiguracje tych źródeł podano w [14] i [97]:

$$\text{IVa - para sił: } R_{IIa}(\theta) = \cos^2(\theta) - \cos^2\Psi \sin^2\theta \quad (6)$$

$$\text{IVb - podwójna para sił: } R_{IIb}(\theta) = \cos^2(\theta) - \sin^2\Psi \sin^2\theta \quad (7)$$

IVc - podwójna para sił z zerowym wypadkowym momentem sił:

$$R_{IIc}(\theta) = \sin(2\theta) \cos\Psi \quad (8)$$

$$\text{IVd - środek obrotu } R_{IIa}(\theta) = \sin(\theta) \sin 2\Psi \quad (9)$$

V Źródło EA związane z rozwieraniem się mikropęknięcia można przedstawić jako superpozycję źródła dylatacyjnego i działania pary sił rozwierających ściany szczeliny pod kątem 45 stopni. Odpowiedni wzór dla pęknięcia leżącego w płaszczyźnie XY podano w [58]

$$R_{IV}(\theta) = \cos^2(\theta) + 2\nu / (1 - 2\nu) \quad (10)$$

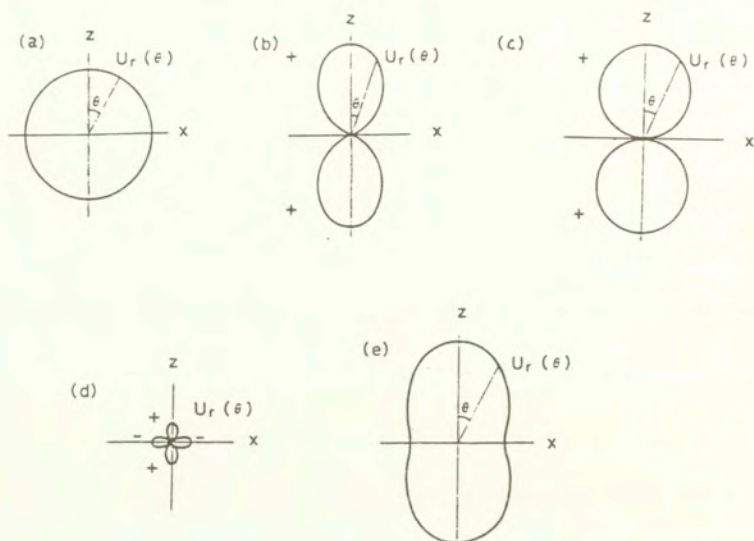
gdzie  $\nu$  jest stałą Poissona.

Charakterystyki kierunkowe opisanych wyżej modeli źródeł EA przedstawiono na Rys. 4.

W procesie identyfikacji źródeł EA istotne znaczenie ma również nachylenie charakterystyki amplitudowo - częstotliwościowej sygnału rejestrowanego przez szerokopasmowy sensor EA. Charakterystyka ta została podana w modelu



elastodynamicznym opracowanym przez Takashimę, Higo i Nunomurę i podanym w [97]. W modelu obszar mikropeknienia  $V_0^*$  zastępuje się strefą inkluzji, będącą materiałem o tych samych stałych sprężystych, co pozostały ośrodek z dodaniem czynnika niesprężystego  $\beta_{ij}^*(x,t)$  w zależności opisującej tensor przemieszczeń w ośrodku, a funkcja amplitudy zmian pola naprężeń jest typu  $f^*C$ .



Rys. 4. Charakterystyki kierunkowe podstawowych modeli źródeł EA wg.[58]. a) dylatacyjne źródło EA (centrum eksplozji), b) pojedyncza siła działająca wzdłuż osi Z, c) para sił działająca w dwóch półprzestrzeniach wzdłuż osi Z, d) para sił z niezerowym momentem, e) rozwieranie się mikropeknienia.

W tym przypadku charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa uzyskana za pomocą sensora rejestrującego sygnał napięciowy proporcjonalny do mierzonego przemieszczenia wzdłuż osi Z ma postać :

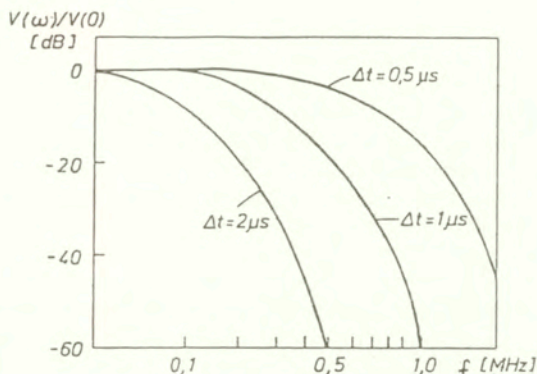
$$|V(\omega)| = \frac{2\mu\Delta\epsilon_{33}^* + \lambda\Delta\epsilon_{33}^*}{4\pi\rho r v_L^3} V_0^* P_0 \exp(-\omega^2 \tau^2) \quad (11)$$

gdzie :  $\omega$  - pulsacja częstotliwości widma sygnału EA,  $\Delta$  - "czas narastania źródła", równy  $4\tau$ ,  $\epsilon_{33}$  - składowa tensora przemieszczeń, charakteryzująca obszar inkluzji o objętości  $V_0^*$ ,  $\rho$  - gęstość ośrodka,  $r$  - odległość źródło - punkt rejestracji sygnału,  $v_L$  - prędkość fali dylatacyjnej,  $\lambda$ ,  $\mu$  - stałe Lamé, charakteryzujące ośrodek,  $P_0$  - współczynnik, charakteryzujący czułość sensora EA w rozpatrywanym przedziale częstotliwości sygnału.

Wyznaczenie czasu narastania źródła, odpowiadającego czasowi kształtowania się niesprężystej deformacji w obrębie źródła EA dokonuje się poprzez podzielenie  $|V(\omega)|$  zmierzonego dla górnych częstotliwości w obrębie pasma pomiarowego przez wartość  $|V(\omega_0)|$ , otrzymaną dla najniższej mierzonej pulsacji  $\omega_0$  wg. wzoru (11).

$$|V(\omega)| / |V(\omega_0)| \equiv \exp [ -(\omega\tau)^2 ] \quad (12)$$

Na Rys.5. przedstawiono zależności iloczynu przedstawionego we wzorze (12) dla trzech różnych czasów narastania źródła.



Rys. 5. Znormalizowane charakterystyki amplitudowo - częstotliwościowe, zarejestrowane sensorem szerokopasmowym dla trzech różnych czasów narastania sygnału źródła EA wg. [97].

## 2.2 Generacja wzorcowych sygnałów EA

W procesie kalibracji toru pomiarowego EA istotne znaczenie ma procedura generacji powtarzalnego sygnału o charakterystyce amplitudowo - częstotliwościowej zbliżonej do wytwarzanych przez rzeczywiste źródła EA. Do częścię wymienianych w literaturze metod generacji wzorcowych sygnałów EA należą [56, 42, 87] :

- łamanie kapilary szklanej na bloku metalowym o dużych wymiarach,
- test A. Nielsena, polegający na kruszeniu pręcika grafitowego umieszczonego w specjalnym uchwycie,
- generowanie sygnału za pomocą wyładowania elektrycznego,
- zrzucanie kulki stalowej,
- generacja fali ciepła przy użyciu lasera,
- rozkruszanie próbki z węgla krzemowego,
- wywołanie przejścia fazowego w stopie Au - 47,5 % Cd.



Sygnal generowany przy użyciu wymienionych wyżej metod ma charakter impulsowy. Stosuje się również metodę generacji sygnału stacjonarnego przy pomocy wzorcowego nadawczego przetwornika EA oraz generację sygnałów o charakterystyce widmowo - częstotliwościowej typu szumowego przy wykorzystaniu zjawiska wypływu gazu z cienkiej dyszy lub wzorcowej próbki poddanej procesowi korozji naprężeniowej.

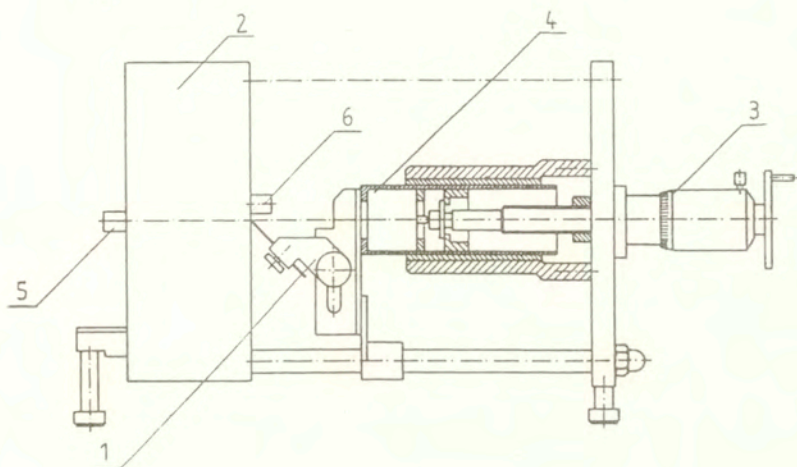
W przypadku wykorzystania pierwszej z opisywanych metod - łamania kapilary o przekroju i masie zanedbywalnie małych w stosunku do masy i wymiarów ośrodka propagacji sygnału EA, osiąga się szczególnie dużą zbieżność wyników eksperymentu z przewidywaniami modelu teoretycznego (średni błąd pomiaru amplitudy przemieszczenia - 0, 03 procent wg [42] ). Metoda ta została w związku z tym zastosowana do absolutnej kalibracji sensorów EA w Amerykańskim Biurze Normalizacyjnym.

Autor rozprawy prowadził badania porównawcze przydatności różnych metod generacji wzorcowych sygnałów EA, opisane w [56]. Najszerze pasno częstotliwości generowanego impulsu EA autor uzyskał wykorzystując urządzenie do łamania próbek z materiałów kruchych, będące modyfikacją stanowiska opisanego w [42]. Stanowisko to, którego schemat funkcjonalny pokazano na Rys. 6. funkcjonuje w sposób następujący : Próbkę poddawane łamaniu, o przekroju 0,5 - 2 mm umieszczone są w uchwycie (1), wykonanym z teflonu w celu minimalizacji tarcia o uchwyt w procesie naprężania konstrukcji. Łamanie próbki jest wywołane jej dociskiem do środka podstawy walca stalowego (2) o średnicy 240 mm i grubości 95 mm. W stosunku do masy walca (28kg) masa próbki i sensora EA jest pomijalna. Próbka jest dociskana do walca za pomocą śruby mikrometrycznej (3), przy czym prowadzenie uchwytu próbki zapewnia utrzymanie stałego kąta osi próbki - powierzchnia walca, przez co w próbce wytwarza się moment zginający. Pomiar siły nacisku na próbkę jest przeprowadzany za pomocą wbudowanej głowicy tensometrycznej (4) wraz z układem wzmacniacza sygnału. Sygnal EA, generowany w procesie łamania próbki jest rejestrowany za pomocą sensora EA (5), umieszczonego na przeciwległej podstawie walca stalowego, w osi walca. Przetwornik EA jest typu szerokopasmowego, opisanego w pierwszym rozdziale niniejszej rozprawy i w [70]. Nieliniowość jego charakterystyki częstotliwościowej w paśmie 100 - 1000 kHz nie przekracza +/- 5% maksymalnej wartości mierzonej amplitudy sygnału. Napięcie elektryczne, proporcjonalne do drugiej pochodnej przemieszczenia mierzonego przez sensor jest po wzmocnieniu w torze szerokopasmowym rejestrowane za pomocą cyfrowego oscloskopu z pamięcią. W pobliżu próbki umieszczony jest pomocniczy przetwornik EA (6), wykorzystywany w celu precyzyjnego wyzwolenia układu rejestracji sygnału. Zarejestrowany sygnał emisji akustycznej wraz z sygnałem pochodzącym z układu pomiaru siły obciążającej próbkę jest transmitowany do komputera w celu dalszej obróbki. Przy łamaniu materiałów kruchych o przekrojach poniżej 0,5 mm uzyskuje się w bloku stalowym czas narastania siły generującej falę sprężystą krótszy od 0,5  $\mu$ s. W zakresie częstotliwości pracy stosowanego sensora EA możliwe jest przyjęcie rodzaju funkcji przemieszczenia generowanej przez układ jako bliskiej funkcji skoku jednostkowego. W takim przypadku zależność czasową składowej przemieszczenia , normalnej do powierzchni walca w osi walca  $U_z(z, w)$ , dla dwóch podstawowych modów fal propagujących się przez ośrodek jest opisana wzorem [48] :



$$U_z = \frac{Z}{2\pi\mu z} \left\{ \frac{w^2(2w^2 - 2 + a^{-2})H(t - z/\alpha)}{(2w^2 - 2 + a^{-2}) - 4(w^2 - 1)w(w^2 - 1 + a^{-2})^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{1}{\alpha} - \frac{2v(y^2 - 1)(y^2 - 1 + a^{-2})^{\frac{1}{2}}H(t - z/\beta)}{(2y^2 - 1)^2 - 4(y^2 - 1)y(y^2 - 1 + a^{-2})^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{1}{\beta} \right\} \quad (13)$$

gdzie:  $\mu$  - stała Lamé,  $w$  - iloczyn czasu i prędkości fali dylatacyjnej, podzielony przez odległość  $z$ ,  $a$  - analogiczny iloczyn czasu i prędkości fali ścinania, podzielony przez  $z$ ,  $H$  - funkcja Heaviside'a,  $\alpha$  - prędkość fali dylatacyjnej,  $\beta$  - prędkość fali ścinania.

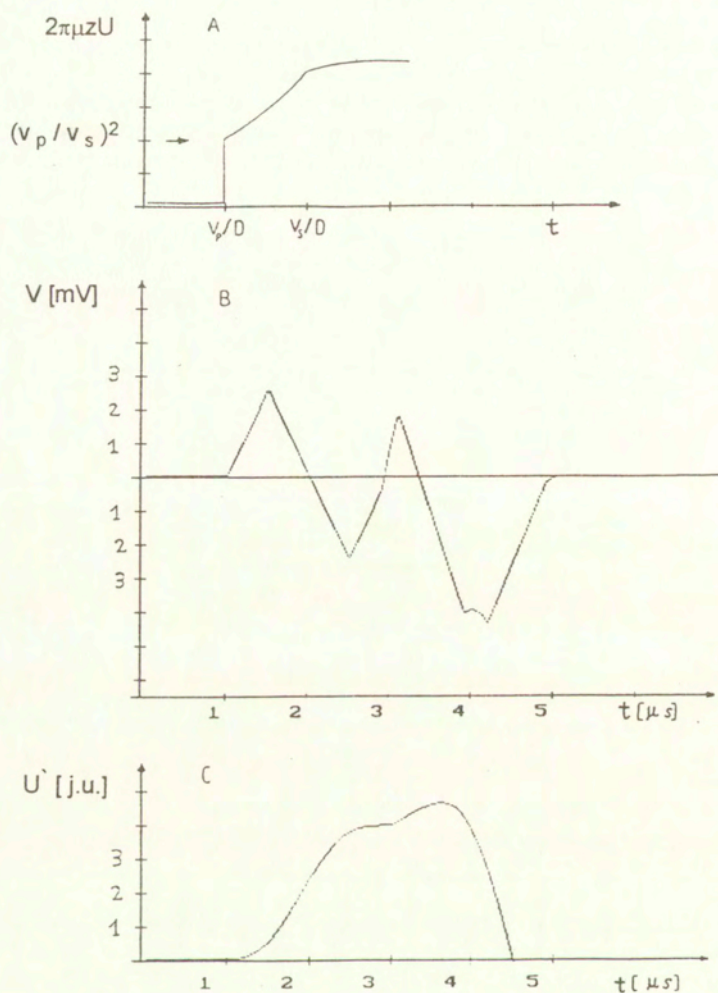


Rys. 6. Urządzenie do generacji wzorcowych impulsów EA (opis w tekście)

Prędkość fali dylatacyjnej w zastosowanym przez autora bloku stalowym (5940 m/s) jest wyższa od prędkości fali ścinania (3220 m/s). Wygenerowany na górnej powierzchni walca impuls EA jest odbierany na przeciwległej powierzchni przez sensor jako sygnał, zawierający przyczynki od kolejno pojawiających się modów fal sprężystych, przy czym jako pierwsza zostanie odebrana czysta fala dylatacyjna, a jako druga - fala ścinania.

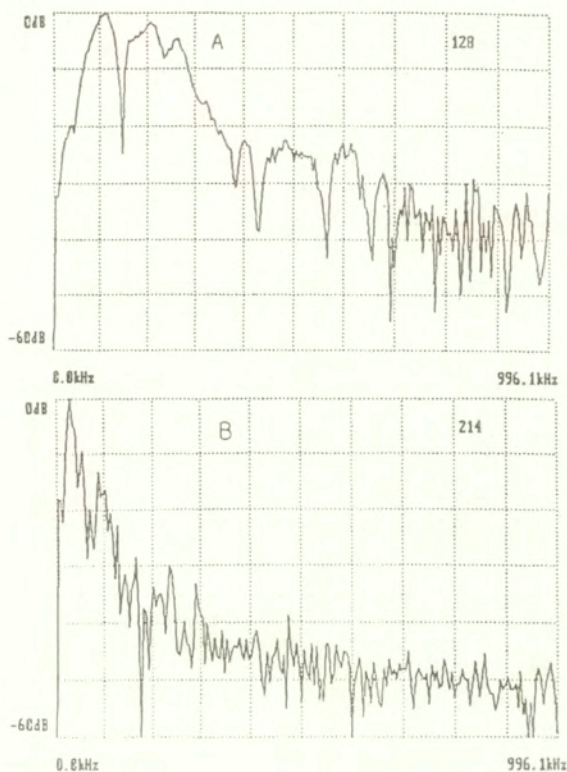
W oparciu o wzór (13) amplituda przemieszczenia w odległości  $z$  od źródła impulsu schodkowego  $U_z$  wynosi  $2\pi\mu z U_z (\beta/\alpha)^2$ . Amplitudy przemieszczeń powodowane nadejściem kolejnych modów można wyznaczyć metodami numerycznymi, posługując się dość złożonymi wyrażeniami, podanymi w [48]. Porównanie kształtu początkowego odcinka sygnału EA zamieszczonego w powyższej pracy z impulsem EA wg [70] oraz z

zarejestrowanym przez autora przy wykorzystaniu omówionego omówionego stanowiska badawczego pokazano na Rys. 7.



Rys. 7. (A) - Początkowy odcinek zależności czasowej przemieszczenia na powierzchni płyty, pobudzonej impulsem schodkowym wg Knopoffa [48], (B) - Sygnał, proporcjonalny do drugiej pochodnej przemieszczenia, zarejestrowany przez autora przy wykorzystaniu omówionego omówionego stanowiska badawczego, (C) - sygnał (B), poddany dwukrotnej operacji całkowania względem czasu w celu uzyskania zależności odpowiadającej postaci modelowej (A).

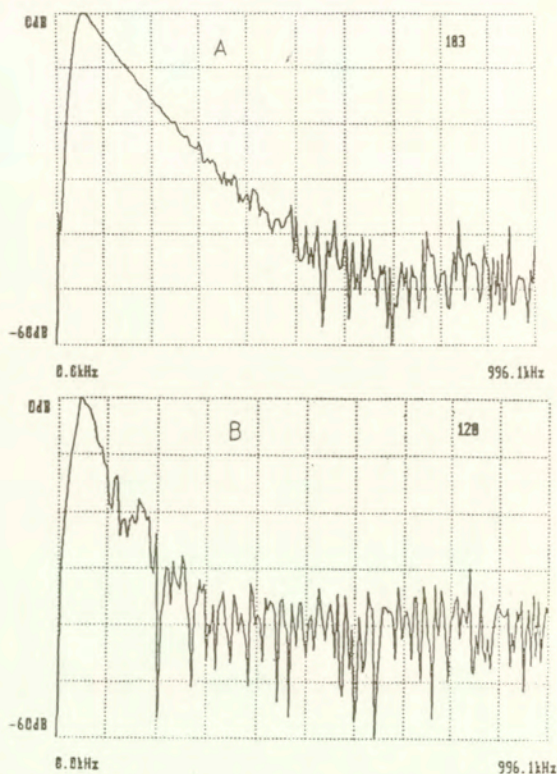
Autor pracy porównał charakterystykę amplitudowo - częstotliwościową dwóch źródeł wzorcowych EA [56]. Pierwsze źródło zostało zrealizowane przy użyciu ramki stalowej, zawieszonej nad klokiem stalowym o masie 0,3 kg. Ramka generowała w klocku impuls EA poprzez uderzenie go z energią  $5 \times 10^{-3}$  J. Drugie źródło, o charakterze szumowym wykorzystywało efekt wypływu powietrza z prędkością 170 m/s z dyszy o średnicy 3 mm bezpośrednio na szerokopasmowy sensor EA. Widma sygnału EA, pochodzące od obu opisanych wyżej źródeł są pokazane na Rys. 8. Przedział częstotliwości generowanych przez źródło impulsowe (mierzony dla 20 dB spadku od wartości najsilniejszego prążka ) przekracza 300 kHz. Przedział częstotliwości określony analogicznie dla źródła szumowego jest mniejszy od 100 kHz. Przeprowadzone badania potwierdzają prezentowaną w literaturze opinię o korzystnych właściwościach źródeł impulsowych przy generacji szerokopasmowych wzorcowych sygnałów EA.



Rys. 8. Porównanie charakterystyk widmowych źródła mechanicznego źródła impulsowego (A) oraz źródła szumowego (B). Oba pomiary przeprowadzone szerokopasmowym sensorem EA typu WD



Krajowa aparatura do pomiarów EA wyposażana jest często w przetworniki typu rezonansowego. Przy użyciu mechanicznego źródła sygnałów wzorcowych EA, opisanego wyżej autor w [56] porównał również charakterystyki widmowo - amplitudowe przetwornika szerokopasmowego z charakterystykami przetworników o częstotliwości rezonansowej 200 i 500 kHz. Przetworniki szerokopasmowe charakteryzują się czułością ok. 20 dB niższą w porównaniu z przetwornikami rezonansowymi. Wynika to z konieczności stosowania w konstrukcjach szerokopasmowych elementów ceramicznych o kształcie ściętego stożka o węższej podstawie nie przekraczającej kilku milimetrów średnicy. Ponieważ czułość sensora EA jest proporcjonalna do pola powierzchni podstawy użytego elementu ceramicznego. W przetwornikach rezonansowych stosuje się elementy ceramiczne o średnicach 10 - 30 mm. Na Rys 9. pokazano charakterystyki widmowo - amplitudowe dwóch przetworników rezonansowych, przy czym skuteczność przetwornika rezonansowego 500 kHz przewyższała skuteczność przetwornika dwustukilohercowego o 10 dB.



Rys. 9. Charakterystyki widmowo - amplitudowe dwóch przetworników rezonansowych, 500 kHz (A) oraz 200 kHz (B), badanych w warunkach analogicznych jak przetwornik rezonansowy z Rys 8A.

### 3.CHARAKTERYZOWANIE SYGNAŁU EA PRZY POMOCY DESKRYPTORÓW

#### 3.1 Wyznaczanie deskryptorów EA

Rzeczywiste układy źródło EA - ośrodek - odbiornik sygnału są znacznie bardziej złożone niż układy modelowe opisane w Rozdziale 2.. Rzeczywiste źródła zajmują określoną objętość, ośrodki, w których jest propagowany sygnał posiadają płaszczyzny graniczne i nieciągłości, a tor pomiaru sygnału EA rejestruje określony zakres częstotliwości. Konsekwencją tego stanu rzeczy jest pojawianie się w torze pomiarowym dodatkowych składników sygnału, będących efektem odbić i transformacji fal sprężystych w ośrodku oraz zniesztalcenie charakterystyki widmowej funkcji źródła EA. Analityczne wyznaczenie związku (funkcji przejścia) pomiędzy sygnałem generowanym przez źródło EA a rejestrowanym sygnałem jest często niemożliwe. Wynika stąd konieczność charakteryzowania źródła EA przez parametry generowane przez stosowany tor pomiarowy i będące wynikiem obróbki rejestrowanego sygnału. Parametry te, zwane deskryptorami dzielą się na dwie zasadnicze grupy. Istnieją deskryptory punktowe, charakteryzujące próbkę sygnału EA zarejestrowaną w określonym przedziale czasowym za pomocą parametru liczbowego. Istnieją też deskryptory charakteryzujące próbkę sygnału EA za pomocą zbioru liczb, nazywane wektorami cech. Celem badania sygnału EA jest precyzyjne określenie charakterystyki jego źródła albo identyfikacja fragmentów sygnału, pochodzących od różnych źródeł. Wymaga to stosowania bądź to możliwie dużego zbioru deskryptorów punktowych bądź to możliwie wieloparametrowego wektora cech. Wyjściowym założeniem czynionym w oparciu o obserwacje praktyczne jest przyjęcie sygnału generowanego przez impulsowe źródło EA w postaci tłumionej sinusoidy [33]. Odcinek czasu zawierający mierzalne wartości sygnału w obrębie tak określonego przebiegu jest nazywany *zdarzeniem EA*. Sygnał elektryczny,  $V_1(t)$ , powstający w sensorze EA w trakcie rejestracji zdarzenia EA ma postać :

$$V_1(t) = A_m \exp(-\alpha_1 t) \sin(2\pi f_0 t) \quad (14)$$

gdzie :  $A_m$  - wartość szczytowa napięcia rejestrowanego w zdarzeniu EA,  $f_0$  , - maksimum charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej układu przetwornik-ośrodek  
 $\alpha_1$  dekrement tłumienia układu przetwornik-ośrodek

Istnieje modyfikacja wzoru (14), uwzględniająca czas narastania sygnału w trakcie rejestracji zdarzenia EA [52] :

$$V_2(t) = A_1 [\exp(-\alpha_2 t) - \exp(-\beta t)] \sin(2\pi f_0 t) \quad (0 < \alpha_2 < \beta) \quad (15)$$



gdzie:  $A_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta$  - parametry kształtu sygnału w trakcie trwania zdarzenia EA, których związek z wartością szczytową i czasem narastania zostanie podany niżej.

Wyrażenia (14) i (15) charakteryzują sygnał EA, określane jako *dyskretna emisja akustyczna* (ang. burst type emission). Inny typ sygnału EA określa się mianem *emisji ciągłej* lub typu *szumowego* (ang. continuous type emission). Interpretacja odcinków czasowych o minimalnym natężeniu sygnału EA implikuje zakwalifikowanie sygnału do jednego z wymienionych wyżej typów. w przypadku dyskretnej EA spadek natężenia sygnału interpretuje się jako efekt zakończenia generacji sygnału przez źródło. W przypadku emisji ciągłej chwilowy spadek natężenia sygnału jest interpretowany jako fluktuację poziomu mocy emitowanej przez źródło. W tym ostatnim przypadku w sygnale nie wyróżnia się zdarzeń EA, a sygnał jest opisany za pomocą charakterystyki widmowej i rozkładu amplitudowego w kolejnych próbkach czasowych.

Wyrażenia (14) i (15) są całkowalne i różniczkowalne metodami analitycznymi, co jest wykorzystywane przy definiowaniu deskryptora nazywanego *zliczeniem EA*. Wartość tego deskryptora jest wyznaczana w trakcie pomiaru EA poprzez sumowanie ilości przekroczeń przez amplitudę sygnału zadanego poziomu, nazywanego *progiem dyskryminacji*. Ilość zliczeń, rejestrowana w jednostce czasu nazywana jest tempem zliczeń, a ilość zdarzeń rejestrowana w jednostce czasu - odpowiednio: tempem zdarzeń. Ustalenie progu dyskryminacji zależy od natężenia sygnału EA, jednak w warunkach praktycznych wartość ta jest na ogół przyjmowana jako 1 V. Dla zdarzenia EA, opisywanego wzorem (14) zależność pomiędzy sumą zliczeń w trakcie zdarzenia EA  $N_{R1}$ , a poziomem dyskryminacji  $A_1$  jest określana wzorem :

$$N_{R1} = f_0 \cdot \alpha_1 \ln(A_m / A_1) \quad (16)$$

Natomiast dla modelu zdarzenia EA, opisanego wzorem (15) zależność pomiędzy sumą zliczeń w trakcie zdarzenia EA -  $N_{R2}$ , a poziomem dyskryminacji  $A_1$  jest określana wyrażeniem przybliżonym :

$$N_{R2} \cong f_0 / \alpha_2 \ln(A_1 / A_1) \quad (17)$$

przy czym pomija się w rozważaniach kilka pierwszych oscylacji o niewielkiej amplitudzie. Dla opisywanego modelu zdarzenia EA można także wyznaczyć odcinek czasu, w którym narasta amplituda mierzonego sygnału  $t_r$  :

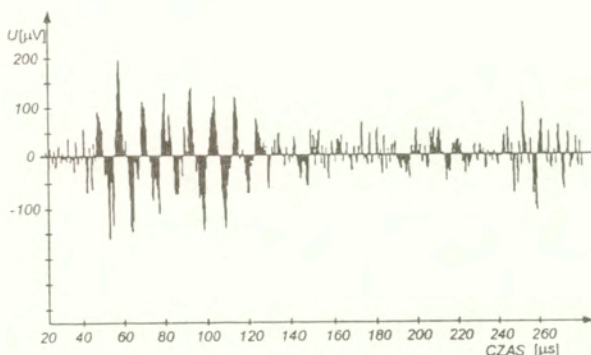
$$t_r = (\beta / \alpha_2) / (\beta - \alpha_2) \quad (18)$$

Wyrażenia (14) i (15) znajdują zastosowanie przy numerycznym wyznaczaniu chwil początkowych kolejnych zdarzeń EA i maksymalnej amplitudy sygnału w trakcie trwania zdarzenia. Procedurę komputerową wykorzystującą w tym celu algorytm filtru Kálmana opisano w [18]. Parametr  $f_0$  można określić obliczając transformatę Fouriera funkcji czasowej opisującej zdarzenie EA. Natomiast z układu równań (15), (17) i (18) można określić pozostałe współczynniki kształtu :  $A_1$ ,  $\beta$  i  $\alpha_2$ . Na Rys. 10 przedstawiono



przykład zdarzenia EA, zarejestrowanego przetwornikiem szerokopasmowym. Źródłem EA był proces pęknięcia włókien w drewnie sosnowym, badany przy udziale autora rozprawy [81, 61, 73]. Niewielkie wymiary źródła sygnału (poniżej 1mm) i niska wartość współczynnika tłumienia fal sprężystych o częstotliwości do 100 kHz ( $< 40$  dB / m) powodują, że sygnał w obrębie zdarzenia EA ma charakterystyczny przebieg - zbliżony do modelu opisywanego wzorem (15).

W oparciu o podaną wyżej procedurę określono parametry kształtu pierwszego ze zdarzeń widocznych na Rys. 10 jako :  $A_1 - 320 \mu\text{V}$  ,  $f_0 - 100 \text{ kHz}$  ,  $\beta - 18 \cdot 10^3 [1/\text{s}]$  i  $\alpha_1 - 2 \cdot 10^3 [1/\text{s}]$  .



Rys. 10. Przykład zdarzenia EA, zarejestrowanego przetwornikiem szerokopasmowym

Analizatory emisji akustycznej są wyposażone w bloki funkcjonalne wyznaczające energię mierzonego sygnału lub wielkości pokrewne funkcji energii. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest realizowane elektronicznie przekształcenie zbioru wartości chwilowych mierzonego sygnału  $V(t)$  na wartość skuteczną  $V_{RMS}$  za odcinek czasu  $T$  według wzoru :

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (19)$$

przyczym energia sygnału EA jest proporcjonalna do kwadratu  $V_{RMS}$  .

Istotnym zagadnieniem w trakcie rejestracji sygnału EA w dłuższym odcinku czasu jest rozkład amplitudowy tego sygnału rejestrowany przez sensor. Badania porównawcze wyników uzyskanych w trakcie różnych eksperymentów z modelami teoretycznymi zamieszczono w [64]. W przypadku emisji typu ciągłego tempo zliczeń przy poziomie dyskryminacji  $A_n$  ma postać :

$$\dot{N}(A_n) = (\dot{N}_p / 2) [1 - \text{erf}(A_n / \sqrt{2})] \quad (20)$$

gdzie:  $\dot{N}_p$  - rejestrowane tempo zliczeń dla maksymalnych amplitud sygnału,  
 $A_n$  - iloraz progu dyskryminacji i odczylenia standartowego wartości oczekiwanej  
 rejestrowanych amplitud, erf - funkcja błędu, podana w paragrafie 2.1.

W przypadku emisji typu dyskretnego w [64] rozważono trzy teoretyczne rozkłady  
 częstości wystąpienia tempa zdarzeń  $\dot{N}_z'$  dla maksymalnych amplitud sygnału  $A_m$ , przy  
 czym  $\zeta$  oznacza maksymalną wartość progu dyskryminacji A:

a) rozkład Rayleigha

$$\dot{N}_z(A_m) = (\dot{N}_c A_m / \zeta^2) \exp(-A_m^2 / 2 \zeta^2) \quad (21)$$

gdzie:  $\dot{N}_c$  - jest całkowitym tempem zdarzeń o różnych amplitudach

b) rozkład prostokątny o postaci

$$\dot{N}_z(A_m) = \dot{N}_c / \zeta \quad (22)$$

dla  $A_m$  w przedziale  $(\zeta, 0)$  oraz 0  
 dla  $A_m$  większych od  $\zeta$ .

c) rozkład trójkątny o postaci

$$\dot{N}_z(A_m) = (2\dot{N}_c / \zeta) (1 - A_m / \zeta) \quad (23)$$

dla  $A_m$  w przedziale  $(\zeta, 0)$  oraz 0  
 dla  $A_m$  większych od  $\zeta$ .

Rozkład tempa zdarzeń o dowolnej amplitudzie dla wyrażenia (21) jest możliwy do  
 wyznaczenia przy pomocy numerycznego scałkowania tego wyrażenia względem  $A_m$ .  
 Analogiczne rozkłady dla wyrażen (22) i (23) są przedstawione niżej (wzory (24) i (24)).

$$\dot{N}_z(A) = \frac{N_c f_s}{\beta} \left[ \frac{A}{\zeta} - \ln \frac{A}{\zeta} - 1 \right] \quad (24)$$

$$\dot{N}_z(A) = \frac{N_c f_s}{\beta} \left[ \frac{2A}{\zeta} - \frac{A^2}{2\zeta} - \ln \frac{A}{\zeta} - \frac{3}{2} \right] \quad (25)$$

gdzie:  $f_s$  środek zakresu częstotliwościowego toru pomiarowego,  $\beta$  - stała.

Ponieważ krzywe amplitudowego rozkładu tempa zdarzeń otrzymywane w oparciu o  
 trzy wyżej przytoczone modele są do siebie podobne, możliwa jest ich aproksymacja za  
 pomocą funkcji potęgowej:

$$N_z(A) = \beta A^\gamma \quad (26)$$

gdzie :  $\beta, \gamma$  - stałe , dobrane empirycznie.

W przypadku pomiarów sensorem typu rezonansowego i rejestracji sygnału o niewielkiej dynamice wyrażenie (26) może być również stosowane do wyznaczania amplitudowego rozkładu tempa zliczeń.

Deskryptory sygnału EA, oparte o pomiar zliczeń lub zdarzeń na wybranym poziomie dyskryminacji amplitudowej lub w oparciu o kształt rejestrowanego przebiegu zostały zebrane w tabeli na końcu niniejszego paragrafu. Omawiane deskryptory należą do grupy parametrów wyznaczanych w wyniku przekształcania zależności czasowych określanych w mierzonym sygnale EA. Osobną grupę deskryptorów otrzymuje się w wyniku analizy parametrów widmowych tego sygnału. Uzyskanie tych parametrów utrudnia szeroki zakres częstotliwości sygnału EA. Najczęściej stosowane metody pomiarowe, związane z przetwarzaniem przebiegu analogowego na postać cyfrową stosuje się do wybranych próbek sygnału, stanowiących kilka procent odcinka czasowego, w którym rejestrujesię emisję akustyczną. Analiza dostatecznej ilości próbek sygnału pozwala na wyznaczenie deskryptorów widmowych reprezentatywnych dla badanego procesu, co zostanie zilustrowane za pomocą praktycznych przykładów w dalszych rozdziałach.

W poniższej tabeli podano za [92], [96] najczęściej stosowane w praktyce deskryptory EA.

Tabela 1.

nazwa deskryptora	dodatkowe wyjaśnienia
pochodne zmian w czasie	
tempo / suma zliczeń	
tempo / suma zdarzeń	
liczba przejść przez wybrany poziom amplitud	liczba przekroczeń 10%, 20 %, 50 % amplitudy maksymalnej
0 - cross	liczba przekroczeń średniego poziomu sygnału
pochodne przebiegów czasowych	
maksymalna amplituda - $V_{PEAK}$	
kurtosis	czwarty moment zmierzonych odchyleń od wartości śr. sygnału
średnia amplituda	
powierzchnia nad wartością średnią	suma iloczynów kolejnych próbekwartości sygnału i przedziałów próbkowania
okres półtrwania	czas trwania sygnału do osiągnięcia połowy amplitudy



Tabela 1. - ciąg dalszy

pochodne energii	
wartość skuteczna za przedział czasu-T - $V_{RMS}$	
wartość maksymalna wielkości $V_{RMS}$ z N kolejnych odcinków czasowych	
wartość średnia wielkości $V_{RMS}$ z N kolejnych odcinków czasowych	
suma bieżąca wielkości $V_{RMS}$ z N kolejnych odcinków czasowych	
współczynnik kształtu	stosunek $V_{PEAK}$ do $V_{RMS}$
wskaźnik wierzchołka	stosunek wartości sygnału w lokalnym maksimum do wybranego deskryptora odniesienia
energia mierzona w przedziale czasu T	
energia zdarzenia / zliczenia	
pochodne rozkładu częstotliwościowego	
częstotliwość maks. prąжка w widmie mocy	
mediana rozkładu widmowego	granica podziału rozkładu na części o równej mocy
częstotliwości maksymalnych prązków w wybranych przedziałach widma	
średnia częstotliwość dla przedziału widmowego o określonej mocy	
szerokość pasma rozkładu widmowego o mocy przekraczającej wybrany poziom	
moc w wybranych przedziałach widmowych	
współczynnik kształtu prązków widmowych	stosunek prąжка maksymalnego do średniej wartości prąжка
liczba przekroczeń wybranego poziomu przez prąжка widma	liczba przekroczeń 10%, 20 %, 50% wartości prąжка maksymalnego

### 3.2. Porównanie wartości deskryptorów dla sygnałów generowanych przez źródło impulsowe i szumowe

Autor rozprawy porównał wartości ośmiu deskryptorów dla sygnałów generowanych przez źródło impulsowe i szumowe, opisane w paragrafie 2.2. Generowane sygnały charakteryzowały się zbliżonym współczynnikiem kształtu. Procedura pomiarowa polegała na zarejestrowaniu ośmiu próbek po 1024 wartości każdego z sygnałów wzorcowych. Próbkę zarejestrowano za pomocą oscyloskopu cyfrowego przy częstotliwości próbkowania 2 MHz. Wyliczenie wartości deskryptorów i ich rozrzutów w obrębie ośmiu repetycji wykonano za pomocą komputera.

Tabela 2. Porównanie wartości ośmiu deskryptorów dla sygnałów generowanych przez źródła impulsowe i szumowe, opisane w paragrafie 2.2 i pokazanych na Rys. 8.

deskryptor	wartość średnia dla źródła impulsowego	wartość średnia dla źródła szumowego	odchylenie standartowe dla źródła impulsowego	odchylenie standartowe dla źródła szumowego
maksymalna amplituda - $V_{PEAK}$ [V]	2,64	1,44	0,14 (5 %)	1,2 (80 %)
wartość skuteczna za przedział czasu T - $V_{RMS}$ [V]	0,71	0,40	0,05 (7 %)	0,24 (61 %)
stosunek $V_{PEAK}$ do $V_{RMS}$	3,7	4,0	0,10 (3 %)	1,0 (25 %)
powierzchnia nad wartością średnią dla 1024 próbek sygnału [mJ]	0,30	0,16	0,02 (8 %)	0,1 (65 %)
liczba przekroczeń 50 % amplitudy maksymalnej	412	133	48,5 (12 %)	199 (150 %)
częstotliwość maks. prążka w widmie mocy [kHz]	37		25,5 (69 %)	142 (45 %)

Tabela 2. - ciąg dalszy

deskryptor	wartość średnia dla źródła impulsowego	wartość średnia dla źródła szumowego	odchylenie standartowe dla źródła impulsowego	odchylenie standartowe dla źródła szumowego
mediana rozkładu widmowego [kHz]	121	475	9,6 (8 %)	14,5 (3 %)
liczba przekroczeń 50% wart. prążka maksymalnego	40,9	* 48,2	4,4 (11 %)	35,9 (74 %)

Z danych zamieszczonych w Tabeli 2. wynika, wartości wszystkich wyznaczonych deskryptorów charakteryzowały się znacznie wyższymi rozrzutami w przypadku źródła typu szumowego (z losowym rozkładem amplitud w sygnale), w porównaniu do źródła o powtarzalnym charakterze rejestrowanego sygnału. Ostatni z porównywanych w Tabeli deskryptorów, t.j. liczba przekroczeń 50 % wartości prążka maksymalnego w sygnale jedynie w niewielkim stopniu pozwala na odróżnienie źródeł o odmiennym charakterze. Pomijając współczynnik kształtu, który z założenia został dobrany jako zbliżony dla obydwu źródeł - wartości sześciu z podanych w Tabeli deskryptorów są różne conajmniej o 100 % wartości. Częstotliwość maksymalna oraz mediana widma mają wyższe wartości w przypadku źródła impulsowego, co świadczy o szerszym paśmie sygnału EA, generowanego za pomocą modelowego źródła typu mechanicznego.



## 4. POMIARY I ANALIZA SYGNAŁU EA W BADANIACH WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH WYBRANYCH MATERIAŁÓW

### 4.1 Wyznaczanie naprężeń krytycznych w próbkach betonowych

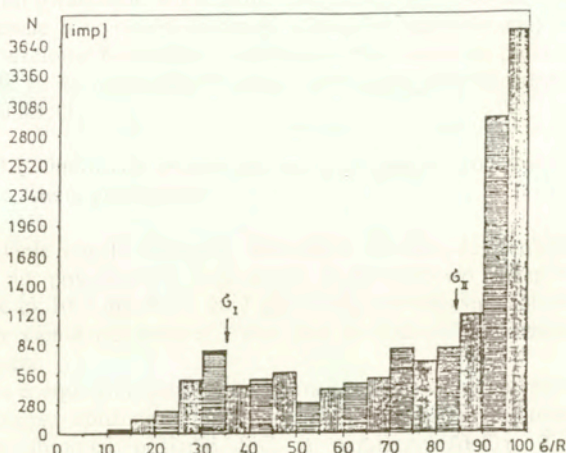
Określanie własności mechanicznych betonu z wykorzystaniem metody EA prowadzono w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej [38]. Badania te okazały się pomocne przy ustaleniu związków pomiędzy sumą zliczeń EA, rejestrowaną w trakcie obciążania próbek betonu a następującymi parametrami [60, 39, 40]:

- wilgotnością próbek,
- procentowym udziałem składników w kompozycji betonowej,
- temperaturą stosowaną w procesie przyspieszonego dojrzewania betonu.

W trakcie omawianych badań, wykonywanych przed 1990 rokiem, zliczenia EA były rejestrowane w czasie mechanicznego obciążania próbek, natomiast korelacja zmian wartości tego deskryptora w funkcji czasu z własnościami mechanicznymi materiału dokonywano poprzez ręczną obróbkę wyników. W celu usprawnienia opisanej procedury pomiarowej autor rozprawy porocował oprzyrządowanie i program komputerowy umożliwiający automatyczne wczytywanie do pamięci systemu obliczeniowego rejestrowanych zliczeń EA i siły obciążającej próbkę. W wyniku tych modyfikacji wybrane parametry mechaniczne badanych próbek mogły być wyznaczone w sposób zautomatyzowany, w wielokrotnie krótszym czasie. Szersze wykorzystanie znalazła zwłaszcza opracowana procedura wyznaczania naprężeń krytycznych w osiowo ściskanych próbkach betonowych.

W metodyce obróbki danych prowadzącej do wyznaczenia tych parametrów wykorzystano trójstadialny model destrukcji betonu [25]. W ramach tego modelu przekroczenie naprężeń krytycznych  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$  w ściskany beton oznaczało przejście do kolejnej fazy procesu niszczenia struktury betonu i w wyniku tego zmianę natężenia generowanego sygnału EA. Naprężenie  $\sigma_I$  jest utożsamiane z doraźną wytrzymałością zmęczenia betonu, natomiast  $\sigma_{II}$  - ze statyczną wytrzymałością długotrwałą. W celu wyznaczenia tych parametrów w trakcie procesu obciążania próbek co 0,1 sekundy rejestrowano wartość zliczeń EA i wartość siły obciążającej próbkę. Zadaniem procedury obróbki danych było wyznaczenie przyrostu zliczeń EA, przypadającego na wzrost zaprężenia osiowego próbki o 5% wartości maksymalnej. Graficzne przedstawienie tych

przyrostów w funkcji naprężenia próbki, podzielonego przez wartość naprężenia niszczonego pokazano na Rys. 11.



Rys. 11. Przebieg zmienności przyrostów zliczeń EA w funkcji naprężenia próbki, podzielonego przez wartość naprężenia niszczonego .

Zgodnie z przyjętym modelem, opracowane oprogramowanie poszukiwało wartości naprężenia krytycznego  $\sigma_I$  w przedziale 0,25 do 0,5 wartości naprężenia niszczonego jako lokalnego minimum przyrostów zliczeń EA. Zmniejszenie się intensywności sygnału EA było powodowane zakończeniem się procesów zamykania porów w materiale. Naprężenie krytyczne  $\sigma_{II}$  było poszukiwane w przedziale 0,55 do 0,95 wartości naprężenia niszczonego jako punkt początkowy odcinka wykładniczego wzrostu wartości przyrostów zliczeń, prowadzącego do zniszczenia próbki. Wysoki poziom intensywności sygnału EA po przekroczeniu naprężenia  $\sigma_{II}$  jest spowodowany niestabilnym wzrostem rys w materiale. Porównawcze zestawienie wyników wyznaczania naprężeń krytycznych metodą pomiaru EA i metodą pomiaru odkształceń dla dwóch kompozycji betonowych o zbliżonym składzie i różniących się wytrzymałością na ściskanie przedstawiono w Tabeli 3. W Tabeli podano także statystyczny błąd badań, t.j. połowę przedziału ufności dla przedziału ufności 95 %. Zamieszczone wyniki są dowodem generalnej zgodności rezultatów uzyskanych przy zastosowaniu obu metod z tym, że wartości średnie  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$ , wyznaczone metodą pomiaru EA są niższe o ok. 10 % od wartości otrzymanych przy pomocy pomiaru odkształceń. Efekt ten jest spowodowany wykorzystaniem odmiennych procesów fizycznych przy pomiarach omawianymi metodami. Sygnały EA są wynikiem rozwoju mikropęknięć wewnątrz próbki, co poprzedza zmiany na jej powierzchni - rejestrowane za pomocą tensometrów.



Tabela 3. Zestawienie wyników wyznaczania naprężeń krytycznych metodą pomiaru EA i metodą pomiaru odkształceń dla dwóch kompozycji betonowych (R oznacza naprężenie niszczące)

badana struktura	rodzaj pomiaru	wynik metodą pomiaru odkształceń	wynik metodą pomiaru EA
kompozycja o średniej wytrzymałości na ściskanie 28,8 [MPa]	pomiar $\sigma_I$	0,3 R $\pm$ 0,01	0,28R $\pm$ 0,03
	pomiar $\sigma_{II}$	0,8R $\pm$ 0,04	0,76R $\pm$ 0,07
kompozycja o średniej wytrzymałości na ściskanie 34,9 [MPa]	pomiar $\sigma_I$	0,4 R $\pm$ 0,02	0,35 R $\pm$ 0,04
	pomiar $\sigma_{II}$	0,7R $\pm$ 0,04	0,64R $\pm$ 0,06

Przy zastosowaniu metody EA uzyskano dwukrotnie większy rozrzut wyników i dwukrotnie większy błąd graniczny pomiaru. Prawdopodobnie było to spowodowane rejestracją sygnałów EA, pochodzących od źródeł EA wywoływanych różnymi procesami (tarcie, rozwój defektów na granicy beton - zaprawa), nie oddziaływującymi bezpośrednio na proces destrukcji. Zastosowanie metody EA umożliwiło określanie naprężeń krytycznych w próbkach kostkowych - do badań tensometrycznych wymagane są bardziej kłopotliwe w użyciu próbki walcowe. Badania metodą pomiaru odkształceń są ponadto wielokrotnie bardziej czasochłonne i kosztowne ze względu na wymóg przyklejania tensometrów. Zalety wykazane w trakcie prowadzenia przedstawionych badań były powodem wdrożenia metody EA do pomiarów wytrzymałościowych próbek betonowych w laboratoriach Politechniki Krakowskiej i wyższej Szkoły Inżynierskiej w Kielcach.

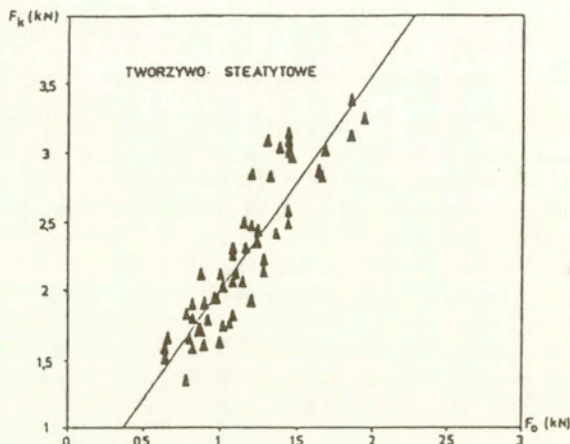
#### 4.2. Badania sygnału emisji akustycznej generowanego w próbkach ceramicznych

Badanie procesów pęknięcia ceramiki było jednym z pierwszych obszarów zastosowań metody EA w Polsce, co zostało opisane w paragrafie 2.3. W latach 1989 - 1992 autor rozprawy z zespołem z Instytutu Technologii Nieorganicznej Politechniki Warszawskiej prowadził badania mające na celu zastosowanie metody EA w badaniach wytrzymałości próbek z ceramiki steatytowej i alundowej [71, 72].

Dla tych materiałów założono istnienie siły progowej  $F_0$ , możliwej do wyznaczenia przy zastosowaniu metody EA, przy czym stosunek  $F_0$  do siły powodującej zniszczenie byłby stałą charakterystyczną dla danego tworzywa. Obciążanie mechaniczne próbek prowadzone było metodą zginania trójpunktowego. Próbki miały kształt prostopadłościenny i wymiary 6 X 7 X 30 mm. Wysoka wartość modułu Younga w ceramice i duża prędkość propagacji pęknięcia krytycznego - rzędu setek m / s implikowały zastosowanie transmisji tempa zliczeń EA z prędkością 100 cykli na sekundę przy prędkości posuwu trawersy obciążającej próbkę równej 0,2 mm / minutę. Do wyznaczenia parametru  $F_0$  służyła procedura numeryczna, porównująca chwilowe wartości tempa zliczeń z poziomem siły obciążającej próbkę. Procedura ta służyła również do

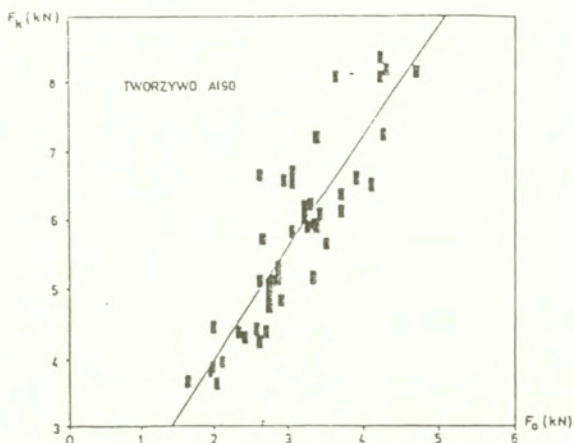


tempa zliczeń z poziomem siły obciążającej próbkę. Procedura ta służyła również do wykreślenia sumy zliczeń EA w funkcji siły obciążającej próbkę do wizualnej kontroli przebiegu eksperymentu. Parametr  $F_0$  był identyfikowany jako wartość siły obciążającej próbkę w chwili, kiedy rozpoczyna się ciągły proces generacji sygnału EA przez próbkę, przy czym wartość progowa sygnału EA została dobrana eksperymentalnie. W trakcie procesu niszczenia próbki rejestrowano kilkaset cykli pomiaru tempa EA, co pozwalało na wyznaczenie  $F_0$  z dokładnością do 1 %. Rysunki 12 i 13 przedstawiają rozkłady wartości siły niszczonej próbkę  $F_k$  w funkcji  $F_0$ , dla badanych zestawów próbek.



Rys. 12. Wykres zależności siły niszczonej od siły progowej dla tworzywa steatytowego typu SF.

Analiza uzyskanych wyników eksperymentalnych umożliwiła wyznaczenie liczbowej zależności pomiędzy siłą progową a siłą niszczącą dla danych tworzyw metodą regresji liniowej. Iloraz  $F_0 / F_k$  jest stałą charakteryzującą proces zniszczenia danego tworzywa metodą zginania trójpunktowego. Dla ceramiki steatytowej parametr ten wynosi 0,557, natomiast dla ceramiki alundowej - 0,564. Przeprowadzone badania wykazały również, że obciążenie omawianych tworzyw siłą  $F_0$  ma znikomy wpływ na poziom wytrzymałości mechanicznej badanych próbek, zatem opisana metoda może być stosowana do atestacji elementów ceramicznych.



Rys. 13. Wykres zależności siły niszczącej od siły progowej dla tworzywa alundowego typu Al 90.

W trakcie laserowej termoobróbki elementów ceramicznych istotnym problemem jest wyznaczenie ilości absorbowanej energii przez materiał i ocena stopnia degradacji jego struktury. Autor pracy przeprowadził badania mające na celu porównanie wartości energii użytych do punktowego napromieniowania próbek ceramicznych z energią sygnału EA, generowaną w trakcie tego procesu [57]. W eksperymentach użyto próbek wykonanych z wysokowytrzymałej ceramiki konstrukcyjnej, projektowanej do zastosowań w silnikach spalinowych. Ze względu na dużą odporność na ścieranie w procesie jej obróbki stosuje się technologię laserową, w trakcie której materiał ceramiczny podlega znaczącym szokom termicznym. W przypadku przekroczenia krytycznego poziomu mocy lasera w materiale występują dwa zjawiska:

- lokalne przetopienie ceramiki,
- rozwój rys w trakcie procesu ochładzania w objętości znacznie większej niż pole poddane ekspozycji na naswietlanie.

Pierwsze z tych zjawisk występuje przy nowoczesnych metodach obróbki ceramiki (cięcie, toczenie) i ze względu na lokalny charakter może nie obniżać wytrzymałości mechanicznej całego elementu poddanego naswietlaniu. Natomiast rozwój rys objętościowych powoduje krytyczne obniżenie wytrzymałości mechanicznej całego elementu.

Teoretyczny model zjawiska powstawania rys przy szokach cieplnych w ceramice podano w [77], [34]. Krytyczna różnica temperatur  $\Delta T_c$ , powodująca rozwój pęknięcia Griffitha o długości początkowej  $l_0$  jest przedstawiana zależnością:

$$\Delta T_c = \left( \frac{2\gamma_f}{\pi \alpha^2 E l_0} \right)^{1/2} \cdot (1 + 2\pi N l_0^2) \quad (27)$$

gdzie:  $\gamma_f$  - parametr materiałowy, odpowiadający energii potrzebnej do wywołania procesu pęknięcia (  $[J / m^2]$  )

$\alpha$  - współczynnik rozszerzalności cieplnej

$E_0$  - moduł sprężystości materiału dla  $N=0$

$N$  - ilość pęknięć Griffitha o długości początkowej większej od  $l_0$  na jednostkę powierzchni

Zjawisko wzrostu rysy od długości  $l_0$  do długości  $l_1$  może być śledzone za pomocą detekcji emisji akustycznej pochodzącej z badanego elementu ceramicznego. Przez emisję akustyczną rozumie się tutaj powstawanie fali sprężystej w trakcie powiększania się rysy. Stwierdzono bowiem, że pomiędzy intensywnością emisji akustycznej a prędkością wzrostu rysy  $da/dt$  istnieje zależność proporcjonalna [77]:

$$dN/dt \approx 1/G_m (da/dt) \quad (28)$$

gdzie:  $dN/dt$  - liczba przekroczeń umownego poziomu przez sygnał EA (zliczenia EA)

$G_m$  - parametr struktury (średnia wielkość ziarna)

Badaniom poddano trzy rodzaje ceramiki : A) azotek krzemu  $Si_3N_4$  B) węgiel krzemu  $SiC$  oraz trójtlenek glinu  $Al_2O_3$  . Z powyższych materiałów zostały wykonane krażki o średnicy 40 mm i grubości ok. 8 mm. Laserowemu naświetlaniu poddawana była płaska powierzchnia krażków, poddana uprzednio polerowaniu i czyszczeniu.

Do naświetlania użyto lasera NdYAG, pracującego w zakresie podczerwieni. W trakcie eksperymentów moc promieniowania zmieniano w zakresie 50 - 1000 W., natomiast czas ekspozycji w zakresie 10 ms - 1 s. Średnica wiązki promieniowania na powierzchni ceramiki wznosiła ok. 1.1 mm.

Należy zaznaczyć, że w trakcie eksperymentów nie występowały problemy z zakłóceniami elektrycznymi i akustycznymi pochodzącymi od lasera (był on oddalony o ok. 25 m, a energia promieniowania przesyłana była za pomocą falowodu.

Promień lasera naświetlał próbkę ceramiczną pionowo z góry, natomiast od spodu do próbki był przymocowany piezoelektryczny sensor EA za pomocą sprężyny dociskowej. Użyty sensor był typu rezonansowego, o częstotliwości 500 kHz . Do przetwornika dołączony był szerokopasmowy przedwzmacniacz o wzmacnieniu napięciowym 40 dB i szumach własnych odniesionych do wejścia nie przekraczających 7.5  $\mu V$  RMS.

Energię sygnału EA wyznaczono poprzez wyliczenie sumy kwadratów wartości skutecznej sygnału mierzonego na sensorze EA. Przyjęto, że robocza impedancja na wejściu analizatora EA wynosi 10 k $\Omega$ , stąd moc chwilowa EA rejestrowana przez analizator wynosi:

$$P = (U_{RMS})^2 / 10 \text{ k}\Omega \quad (29)$$

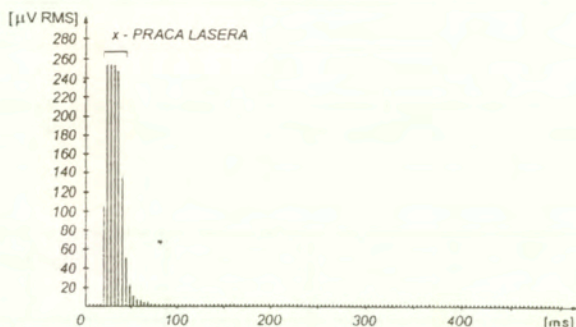
Badane próbki były naświetlane wiązką promieniowania o takiej energii, która nie wywoływała znaczącego podniesienia temperatury całej próbki. Kolejne punkty poddane



naświetlaniu były od siebie oddalone o 3.5 mm. W ramach analizy zależności : energia rejestrowana przez sensor EA - energia wiązki lasera zostały rozpatrzone dwa przypadki (I) : zakres mocy, gdzie nie rejestrowano procesów przetwarzania materiału oraz (II) : zakres mocy, gdzie obserwowano powstanie strefy przetwarzania.

#### 4.2.1. Omówienie procesu naświetlania laserowego przy użyciu mocy nie powodującej powstania strefy przetwarzania

W pierwszym zakresie naświetlania z mocą nie powodującą powstania strefy przetwarzania rejestrowany sygnał EA miał dla badanych trzech typów ceramiki typowy przebieg, pokazany na rys. 14. Na tym rysunku przedstawione jest napięcie skuteczne na sensorze EA (jednostki umowne) w funkcji czasu. Jako "x" oznaczono czas pracy lasera. W trakcie tego czasu sensor EA rejestrował duże natężenie sygnału EA, powodowane efektem trwającego szoku cieplnego. Po wyłączeniu lasera energia sygnału EA maleje wykładniczo, podobnie jak w naświetlanych próbkach metalowych, co będzie opisane niżej.



Rys. 14. Zależność wartości skutecznej napięcia sygnału EA od czasu dla próbki z SiC. Moc lasera 200 W, czas naświetlania - 25 ms.

Tabele 4 - 6 przedstawiają zależność rejestrowanej energii EA w trakcie trwania impulsu lasera oraz po jego wyłączeniu w zależności od poziomu energii tego impulsu. Czas trwania impulsu wynosił w tym przypadku 25 ms, natomiast moc lasera zmieniała się od 50 do 200 W.

Tabela 4. Zależność rejestrowanej energii EA w trakcie trwania impulsu oraz po jego wyłączeniu od poziomu energii tego impulsu. Materiał : SiC

energia impulsu lasera	[J]	1.25	2.5	5	10
energia EA w trakcie impulsu	[pJ]	0.03	0.067	0.073	0.087
energia EA w trakcie i po wyłączeniu impulsu	[pJ]	0.033	0.070	0.073	0.120

Tabela 5. Zależność rejestrowanej energii EA w trakcie trwania impulsu oraz po jego wyłączeniu od poziomu energii tego impulsu. Materiał : Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

energia impulsu lasera	[J]	1.25	2.5	5	10
energia EA w trakcie impulsu	[pJ]	0.0004	0.003	0.040	0.082
energia EA w trakcie i po wyłączeniu impulsu	[pJ]	0.0004	0.003	0.051	0.122

Tabela 6. Zależność rejestrowanej energii EA w trakcie trwania impulsu oraz po jego wyłączeniu od poziomu energii tego impulsu. Materiał :  $Al_2O_3$

energia impulsu lasera	[J]	1.25	2.5	5	10
energia EA w trakcie impulsu	[pJ]	0.0002	0.010	0.020	0.011
energia EA w trakcie i po wyłączeniu impulsu	[pJ]	0.0002	0.019	0.039	0.037

W poniższej tabeli przedstawiono zależność innego parametru - zliczeń przekroczeń progu IV przez sygnał EA. Parametr ten zależy od użytej mocy lasera oraz od rodzaju ceramiki.

Tabela 7. Zależność rejestrowanych zliczeń EA w trakcie trwania impulsu od mocy lasera i rodzaju ceramiki

materiał	$Si_3N_4$	SiC	$Si_3N_4$	SiC	$Si_3N_4$	SiC
energia impulsu [W]	200	200	400	400	800	800
zliczenia EA	682	1110	2186	2990	5891	6461

Dla materiałów ceramicznych, prezentowanych w Tabeli 7. zliczenia EA rosną wraz ze wzrostem energii impulsu lasera według funkcji wykładniczej, z wykładnikiem rzędu 0,5. Z porównania energii promieniowania lasera i rejestrowanej energii akustycznej wynika, że (uwzględniając zbliżone temperatury topnienia badanych tworzyw) - najwyższy współczynnik absorpcji posiadał SiC, a najniższy  $Al_2O_3$ . Ze wzrostem energii promieniowania rośnie absorbowana energia akustyczna, lecz zależność tych wielkości ma charakter nieliniowy. Czas wybrzmiewania sygnału EA po wyłączeniu lasera, będący

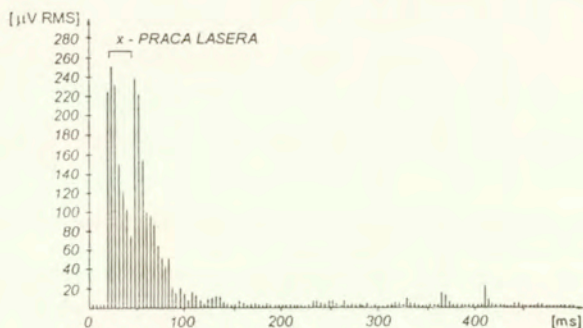


miarą sprężystości badanych materiałów jest zbliżony dla  $\text{Si}_3\text{N}_4$  i  $\text{SiC}$ , natomiast jest znacznie dłuższy dla  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . W przypadku  $\text{Al}_2\text{O}_3$  całkowita energia rejestrowanego sygnału EA jest dwukrotnie większa niż energia EA rejestrowana w trakcie pracy lasera. W  $\text{SiC}$  (materiale o wysokiej absorpcji użytego promieniowania) już przy stosunkowo niskich, kilkudziesięciu energiiach impulsu rozpoczynają się procesy rozwoju defektów strukturalnych, co na wykresach EA jest rejestrowane jako dodatkowe piki energetyczne po wyłączeniu lasera

#### 4.2.2. Omówienie procesu naświetlania laserowego wywołującego powstawanie strefy przetapiania

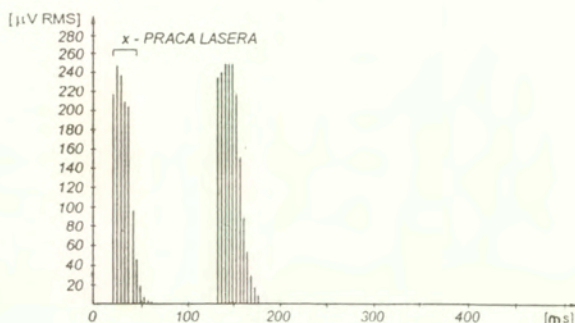
Naświetlanie trzech badanych materiałów w zakresie I, obejmującym niewielkie moce lasera nie powodowało widocznych makroskopowo zmian na ich powierzchni. Przekroczenie ok. 10 J dla  $\text{SiC}$  i 20 J dla  $\text{Si}_3\text{N}_4$  powodowało lokalne przetopienie tych materiałów do głębokości poniżej 1 mm oraz uszkodzenia powierzchni w strefie szerszej niż wiązka lasera.

Z porównania energii promieniowania lasera i rejestrowanej energii akustycznej wynika, że (uwzględniając zbliżone temperatury topnienia badanych tworzyw) - najwyższy współczynnik absorpcji posiadał  $\text{SiC}$ , a najniższy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ze wzrostem energii promieniowania rośnie absorbowana energia akustyczna, lecz zależność tych wielkości ma charakter nieliniowy. Czas wybrzmiewania sygnału EA po wyłączeniu lasera, będący miarą sprężystości badanych materiałów jest zbliżony dla  $\text{Si}_3\text{N}_4$  i  $\text{SiC}$ , natomiast jest znacznie dłuższy dla  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . W przypadku  $\text{Al}_2\text{O}_3$  całkowita energia rejestrowanego sygnału EA jest dwukrotnie większa niż energia EA rejestrowana w trakcie pracy lasera. W  $\text{SiC}$  (materiale o wysokiej absorpcji użytego promieniowania) już przy stosunkowo niskich, kilkudziesięciu energiach impulsu rozpoczynają się procesy rozwoju defektów strukturalnych [17], co na wykresach EA jest rejestrowane jako dodatkowe piki energetyczne po wyłączeniu lasera. Typowy wykres aktywności akustycznej zarejestrowanej dla tych materiałów pokazano na Rys. 15. i 16.



Rys. 15. Zależność wartości skutecznej napięcia sygnału EA od czasu dla próbki z  $\text{SiC}$ . Moc lasera 1000 W, czas naświetlania - 25 ms.

W obu przypadkach aktywność akustyczna naświetlanych próbek trwała znacznie dłużej niż czas trwania impulsu laserowego. Interesujące jest wystąpienie drugiego maksimum sygnału EA. Pierwsze maksimum jest związane z procesem relaksacji naprężeń w trakcie pracy lasera, natomiast drugie z procesami rekrytalizacji i towarzyszącym im rozwojem rys. W przypadku  $\text{Si}_3\text{N}_4$  akustyczne rekrytalizacyjne maksimum sygnału EA występuje znacznie później (do kilkudziesięciu ms opóźnienia) niż w przypadku  $\text{SiC}$  (5 - 20 ms opóźnienia). Może to być skutkiem różnych wartości współczynnika przewodności cieplnej tych materiałów.



Rys. 16. Zależność wartości skutecznej napięcia sygnału EA od czasu dla próbki z  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Moc lasera 1000 W, czas naświetlania - 25 ms.

W Tabeli 8. porównano energie sygnału EA odpowiadające procesom rekrytalizacyjnym, liczone od momentu wyłączenia lasera. Laser emitował moc 1000 W, regulacji podlegał czas trwania naświetlania.

Tabela 8. Energia akustyczna sygnału EA, odpowiadająca procesom rekrytalizacyjnym

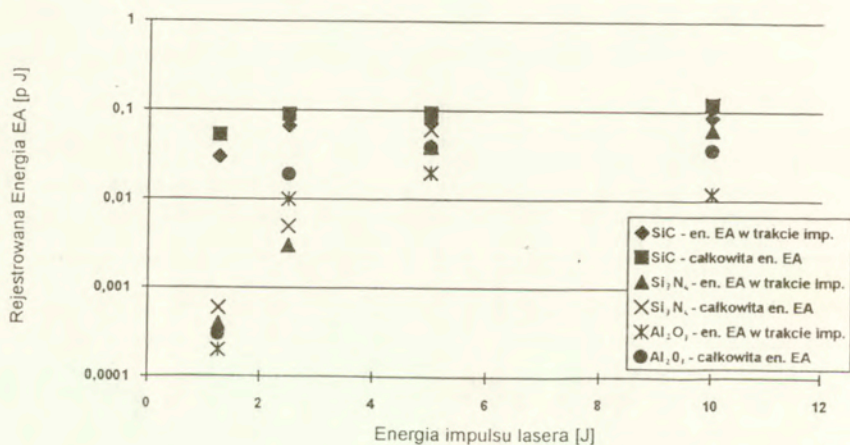
energia impulsu lasera	[J]	8	12	16	20	24
energia EA dla $\text{SiC}$	[pJ]	0.05	0.04	0.07	0.3	0.18
energia EA dla $\text{Si}_3\text{N}_4$	[pJ]	0.01	0.15	0.26	0.70	0.88

Dla ceramiki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nie udało się uzyskać efektu przetopienia pomimo stosowania naświetlania o energii rzędu tysiąca dżuli ze względu na znikomą absorpcję tego materiału.

Przeprowadzone badania pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Pomiar emisji akustycznej w trakcie naświetlania laserem próbek ceramicznych jest czułym miernikiem efektów materiałowych towarzyszących szokom cieplnym,
- również szoki cieplne nie powodujące destrukcji struktury ceramiki (energje promieniowania rzędu 1J/ 10 ms) mogą być monitorowane z wykorzystaniem metody EA,
- zależność energii sygnału EA od energii źródła szoku cieplnego nie jest liniowa i jest różna dla ceramik o różnej absorpcji użytego promieniowania ,
- rozpatrując trzy badane rodzaje materiałów ceramicznych, najwyższą absorpcję zarejestrowano w przypadku SiC, natomiast absorpcja  $Al_2O_3$  była znikoma w porównaniu z dwoma pozostałymi,
- rozwój procesów destrukcji struktury ceramiki, w tym wzrost mikrorys może być rejestrowany za pomocą metody EA,
- prosesy destrukcji struktury ceramiki generują sygnał EA po wyłączeniu lasera; energia tych sygnałów ma poziom porównywalny z energią generowaną w trakcie naświetlania z mocą lasera rzędu 50 - 100 W przez 25 ms.

Zestawienie rejestrowanych energii sygnału EA w zależności od energii impulsu promieniowania laserowego dla omawianych materiałów ceramicznych przedstawiono na Rys 17.

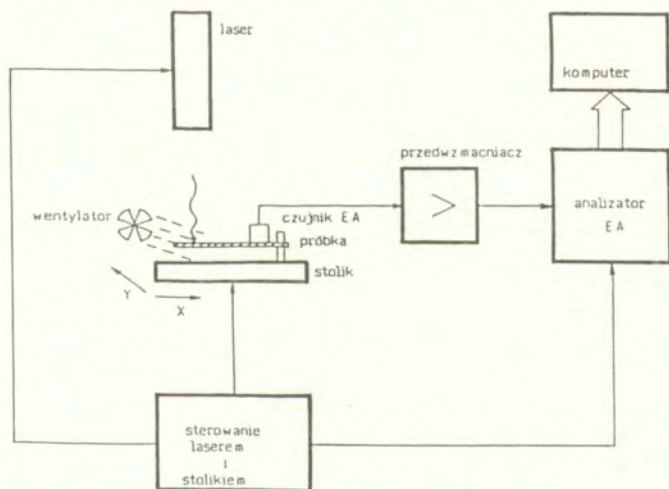


Rys. 17. Zestawienie rejestrowanych energii sygnału EA w zależności od energii impulsu promieniowania laserowego dla omawianych materiałów ceramicznych .



#### 4.3. Badania sygnału emisji akustycznej towarzyszącego procesowi termoo obróbki blach

Pomiar tempa zliczeń EA znalazł zastosowanie w monitorowaniu przebiegów deformacyjnych zachodzących w metalach poddanych obróbce cieplnej przy użyciu lasera [81], [29]. Prace badawcze, prowadzone w IPPT, miały na celu określenie optymalnych parametrów wiązki laserowej w procesie kształtowania blach. Cykliczne naświetlanie blachy wiązką promieniowania laserowego, połączone ukierunkowaną absorpcją energii cieplnej powoduje powstanie pola naprężeń wywołującego trwale deformacje obrabianego elementu. Kształtowanie powierzchni rozwijalnych dokonuje się przez wprowadzenie do materiału termicznych naprężeń zginających, natomiast w przypadku powierzchni obrotowych deformacje uzyskuje się poprzez naprężenia ściskające i zginające. Zastosowanie laserowego kształtowania pozwala na wyeliminowanie z procesu technologicznego przykładania sił zewnętrznych: żądany kształt elementu uzyskuje się przez kontrolowane komputerowo sterowanie układem ruchomego stołu, lasera i systemu chłodzącego wraz z systemem monitorującym geometrię elementu. Częścią składową systemu monitorującego jest analizator sygnału EA, pochodzącego z obrabianego materiału. Schemat stanowiska badawczego do pomiarów sygnału EA towarzyszących laserowemu kształtowaniu blach pokazano na Rys. 18. Wiązka promieniowania laserowego kierowana jest przez układ skupiający, który pozwala na regulację jej średnicy. Element poddany kształtowaniu jest zamocowany na ruchomym stoliku technologicznym, którego przesuw są sterowane za pomocą komputera. Ruch próbki powoduje przemieszczanie się wiązki promieniowania po powierzchni obrabianego materiału z zadaną prędkością. W zależności od rodzaju materiału, wymiarów próbki oraz pożądanego charakteru deformacji wynikowej możliwe jest programowanie mocy wiązki i jej średnicy w funkcji współrzędnych miejsca naświetlania.



Rys. 18. Schemat stanowiska badawczego do pomiarów sygnału EA towarzyszących laserowemu kształtowaniu blach.

W procesie dobierania parametrów wiązki kształtującej wykorzystano wyniki obliczeń modelowych, uwzględniających zarówno wymagane zmiany geometrii, jak i własności zastosowanego absorbera pokrywającego obrabianą powierzchnię metalową.

W trakcie procesu laserowego kształtowania elementów metalowych szeregowi zjawisk powstających w obrabianym materiale towarzyszy emisja akustyczna. Głównym jej źródłem są odkształcenia dylatacyjne powstające pod wpływem pola gradientów temperatur. Drugim istotnym źródłem sygnału EA jest proces powstawania i rozwoju mikropeknięć, generacja i propagacja dyslokacji dyslokacji. Proces generacji promieniowania elektromagnetycznego jest również źródłem sygnału zakłócającego o dużym natężeniu. Kolejnym źródłem zakłóceń jest proces odparowywania materiału (bądź warstwy absorbera) z obrabianej powierzchni. Z danych zamieszczonych w literaturze [89] wynika, że sygnał EA generowany w procesie naświetlania powierzchni metalowej przy braku efektów szumowych, związanych z odparowywaniem powierzchni zawiera się w przedziale 200 - 600 kHz. W celu eliminacji zakłóceń w omawianych badaniach zastosowano rejestrację sygnału za pomocą przetwornika rezonansowego o częstotliwości 500 kHz i górnoprzepustową filtrację sygnałów z częstotliwością graniczną 50 kHz. Ponieważ procesy chłodzenia obrabianej powierzchni za pomocą strumienia pyłu wodnego oraz szum wywoływany przez przemieszczający się stolik roboczy generowały sygnał EA wielokrotnie przewyższający poziom sygnału pochodzący z kształtowanej struktury, rejestrację sygnału użytecznego prowadzono po zakończeniu kolejnych faz naświetlania i po zatrzymaniu stolika. Okres rejestracji trwał 10 minut przy prędkości rejestracji 10 cykli zapisów tempa zliczeń EA na sekundę. Badaniu poddano próbki z blachy kwasoodpornej 1H18N9T o następującym składzie:

Cr : 17 - 19 %, Ni : 8 - 10 %, Mn : 2 %, S : 0,8 %, C : 0,1 %, Ti : 0,5 - 8,8 %.

Próbki z blachy miały wymiary 150 X 100 mm i grubość 0,5 mm. Proces naświetlania dla każdej z próbek powtarzano kilkakrotnie po tym samym śladzie i w tym samym miejscu na wszystkich próbkach. Jako źródła promieniowania użyto lasera CO<sub>2</sub> o mocy 2000 W i długości fali 10,6 μm. Dla uniknięcia efektu odbicia promieniowania od powierzchni próbki pokrywano jej powierzchnię roztworem grafitu w szkle wodnym przy czym proces ten powtarzano po każdym naświetlaniu. Dla tak przygotowanej powierzchni współczynnik absorpcji wynosił ok. 80 %. Na Rys. 19. przedstawia typowy wykres czasowy aktywności akustycznej opisanej próbki. Gęstość zliczeń EA w funkcji czasu ma dla wszystkich pomiarów tego typu charakter malejącej funkcji wykładniczej z czasem połowicznego zaniku ok. 50 s. Metodą najmniejszych kwadratów dopasowano do zarejestrowanych danych eksperymentalnych krzywą o postaci:

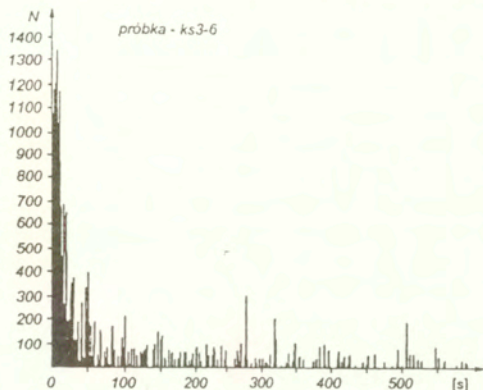
$$N_i = N_0 e^{-\alpha i T_r} \quad (30)$$

gdzie  $\alpha$  oznacza współczynnik zaniku,  $i$  jest numerem kolejnego punktu pomiarowego, a  $T_r$  jest czasem trwania kolejnych cykli pomiarowych (100 ms).

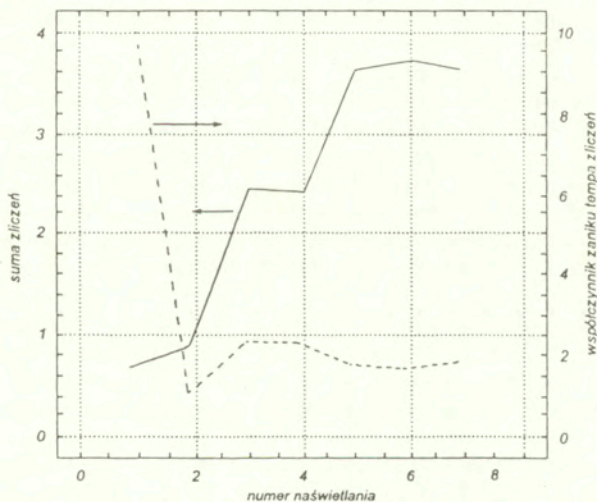
Wyniki obliczeń przedstawiono na Rys. 20. Średnia wartość współczynnika zaniku dla próbek ze stali kwasoodpornej wynosi ok.  $2 \cdot 10^{-3} [s^{-1}]$  i praktycznie nie zmienia się w funkcji liczby kolejnych naświetleń. Natomiast suma zliczeń rejestrowanych po każdym



naświetleniu zmienia się w szerokich granicach (maksymalnie dziesięciokrotnie). Po drugim naświetleniu osiąga ona wartość minimalną. Jest to prawdopodobnie spowodowane kumulacją degradacji materiału w wyniku lokalnie przebiegających procesów rekrytalizacyjnych. Zbliżony charakter przebiegu aktywności akustycznej uzyskano przy badaniu próbek o zbliżonych wymiarach i wykonanych z tytanu.



Rys. 19. Zależność tempa zliczeń EA od czasu, zarejestrowana po naświetleniu laserem próbki z blachy kwasoodpornej.



Rys. 20. Zależność sumy zliczeń EA i współczynnika zaniku tempa zliczeń EA w funkcji ilości naświetleń wiązką promieniowania laserowego - w próbce z blachy kwasoodpornej



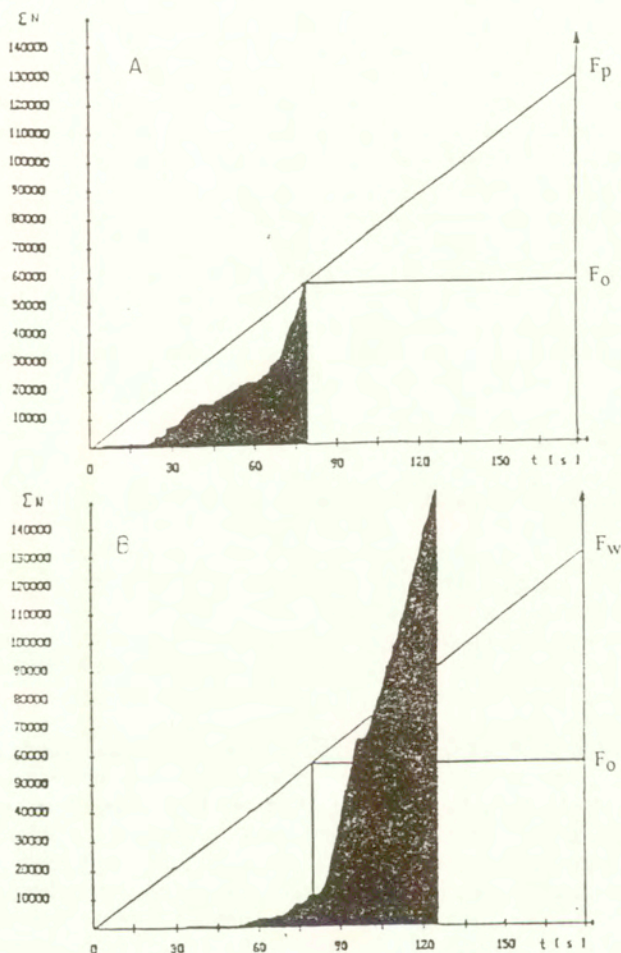
#### 4.4 Pomiar Effektu Kaisera w belkach betonowych.

W trakcie badań prowadzonych przez J Kaisera [44] zostały zarejestrowane sygnały EA towarzyszące procesowi jednoosiowego rozciągania próbek z cyny, ołowiu, duralu, miedzi i stali [44]. W większości z tych materiałów udało mu się obserwowano nieodwracalny efekt związany z dynamiką procesów destrukcji materiału w funkcji obciążenia - nazwany Efektem Kaisera. Efekt ten polega na tym, że jeżeli w elemencie z metalu wywołamy naprężenie  $\sigma_A$ , a następnie ten element odciążymy w ten sposób, że wartość naprężenia zmniejszy się w mim do bliskiej zera wartości  $\sigma_1$  i następnie ponownie wywołamy w nim naprężenie  $\sigma_A$ , to przy ponownym obciążeniu znaczące sygnały EA będą przez ten element generowane dopiero po przekroczeniu naprężenia  $\sigma_A$ . Efekt Kaisera występuje w większości metali obciążonych do wartości niższej od granicy plastyczności. Wzrost gęstości dyslokacji i ich propagacja w plastycznym zakresie obciążeń powoduje dodatkową generację sygnału EA [68].

Istnienie Effektu Kaisera zostało również potwierdzone w badaniach złożonych konstrukcji metalowych obciążanych do wartości nie przekraczającej granicy plastyczności najsłabszego z elementów składowych konstrukcji. Przebieg zależności czasowej amplitudy maksymalnej sygnału EA rejestrowanego w trakcie próby ciśnieniowej zbiornika stalowego podano w [50]. W trakcie omawianej próby ciśnieniowej rejestrowano szum toru pomiarowego na poziomie 10 dB w odniesieniu do  $1 \text{ V} / \text{m s}^{-1}$ . W trakcie procesu ponownego obciążania zbiornika, po przekroczeniu wartości obciążenia przyłożonego w trakcie pierwszego cyklu obciążania, t.j. 170 atm, zaobserwowano gwałtowny wzrost amplitudy maksymalnej sygnału EA do wartości 25 dB.

Badania emisji akustycznej generowanej przez ściskane osiowo próbki betonowe prowadzone na Politechnice Wrocławskiej [60], wykazały istnienie efektu Kaisera również dla tego materiału. Jednakże przebiegające w długich okresach czasu procesy hydratacyjne powodują wzrost wytrzymałości elementu i tym samym osłabienie Effektu Kaisera. Efekt Kaisera jest zatem dla betonu funkcją obciążenia pierwotnego, parametrów klimatycznych otoczenia, w którym znajduje się element betonowy oraz czasu, który upłynął od chwili przyłożenia obciążenia pierwotnego. Na Rys. 21 pokazano sumę zliczeń oraz siłę obciążającą element betonowy w trakcie badania Effektu Kaisera, prowadzonego przy udziale autora rozprawy. Po zakończeniu pierwszego cyklu obciążania elementu, pokazanego na Rys. 21 A nastąpiła przerwa technologiczna nie przekraczająca 60 minut, po czym element obciążono powtórnie (Rys. 21 B). W eksperymencie użyto belki żelbetowej o długości 3,8 m i przekroju 0,3 X 0,3 m, zginanej metodą trójpunktową za pomocą hydraulicznej maszyny wytrzymałościowej. Zależność czasową siły obciążającej belkę pokazano z prawej strony obu rysunków, przy czym jako  $F_p$  oznaczono przebieg siły w trakcie pierwszego obciążania (do wartości  $F_0$ ), a jako  $F_w$  oznaczono przebieg siły w trakcie ponownego obciążania belki. Rejestrację sumy zliczeń EA prowadzono przy progu dyskryminacji 1 V i całkowitym wzmocnieniu 85 dB. Obszar generacji znaczących zliczeń EA, t.j. przekraczających 200 jednostek w trakcie trwania cyklu pomiaru, trwającego

0,1 sekundy nastąpił po przekroczeniu obciążenia  $F_0$ , wynoszącego  $3 \times 10^5$  N. Wartość siły, odpowiadającej momentowi pojawienia się znaczących zliczeń EA w trakcie ponownego obciążania belki różniła się od  $F_0$  mniej niż 10 %. Badanie historii obciążenia elementów betonowych z wykorzystaniem efektu Kaisera jest źródłem użytecznych informacji w procesie projektowania złożonych konstrukcji betonowych.



Rys. 21. Suma zliczeń EA (oś z prawej) oraz siła (oś z lewej strony), obciążająca element betonowy w trakcie badania Efektu Kaisera. Górna część rysunku - pierwsze obciążenie elementu; dolna część rysunku - ponowne obciążenie elementu.



#### 4.5. Pomiary Efektu Felicity w elementach kompozytowych

W obciążonym mechanicznie elemencie kompozytowym istnieją różne mechanizmy generacji sygnału EA. Są one związane z takimi procesami destrukcji materiału, jak : pękanie w wysuwaniu się włókien z matrycy, uszkodzenia matrycy oraz utrata przyczepności włókien do matrycy. Wymienione wyżej mechanizmy mogą być jednocześnie źródłem generacji sygnału EA, co znacznie komplikuje procedury identyfikacji jego pochodzenia. Procedury takie zostały zalecane do stosowania w badaniach wytrzymałościowych w USA na początku lat osiemdziesiątych [2, 28], natomiast ich adaptacją do wymagań występujących w Polsce zajmuje się zespół pod kierownictwem Prof. L. Gołaskiego [31].

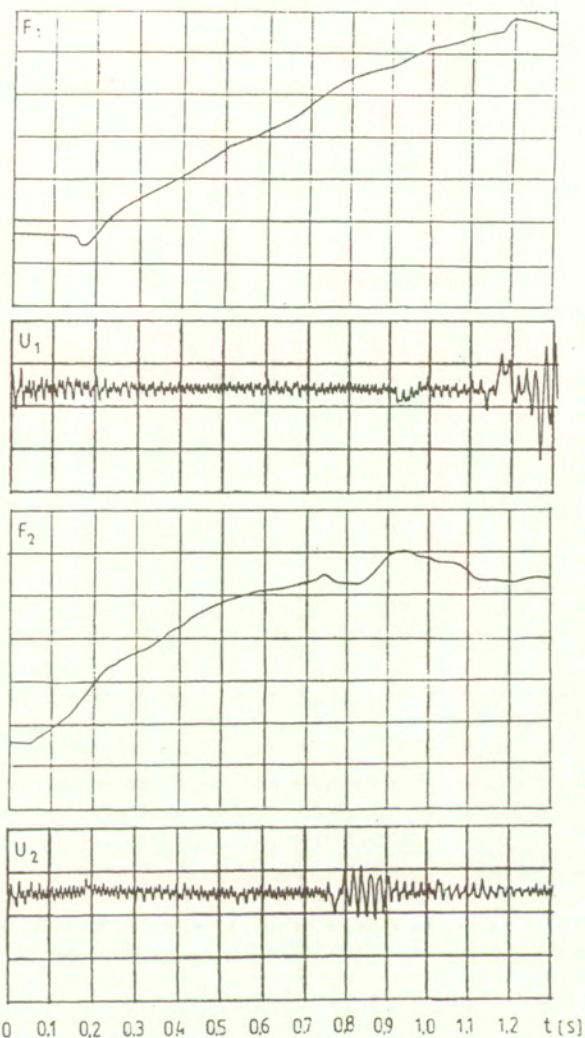
Objęte normami metody badań bazują na czterech kryteriach oceny :

- natężenia sygnału EA podczas utrzymywania stałego obciążenia,
- całkowitej liczbie zliczeń / zdarzeń, zarejestrowanej w trakcie trwania cyklu powiększania i utrzymywania stałego obciążenia,
- liczbie zliczeń / zdarzeń wysokoamplitudowych ( $\geq 40$  dB w odniesieniu do  $1 \text{ V} / \text{m s}^{-1}$ ) w trakcie trwania cyklu powiększania i utrzymywania stałego obciążenia,
- współczynnika Felicity.

Ostatni z wymienionych wyżej deskryptorów jest stosowany wyłącznie w badaniach materiałów kompozytowych. Został wprowadzony przez Fowley'a i Gray'a w 1979 r. [27]. Wprowadzenie współczynnika Felicity wiąże się z odkryciem pojawiania się wyraźnego sygnału EA przy niższych poziomach obciążenia w kolejnych cyklach obciążenia materiału kompozytowego - inaczej niż dla materiałów, w których występuje efekt Kaisera, opisany w poprzednim podrozdziale. Stosowana definicja współczynnika Felicity brzmi : "iloraz wartości obciążenia w kolejnym cyklu obciążenia, dla którego rejestruje się znaczący poziom sygnału EA oraz wartości maksymalnej obciążenia w poprzednim (lub początkowym) cyklu obciążenia".

Zakłada się przy tym, że źródłem sygnału przy obciążeniu kompozytu w kolejnych cyklach, poniżej wartości maksymalnej osiągniętej w cyklach poprzednich są wady strukturalne, w otoczeniu których występuje lokalna koncentracja naprężeń [31]. W wyniku generacji sygnału EA przez te wady często obserwuje się liniową zależność pomiędzy wartością współczynnika Felicity, a stosunkiem obciążenie próby / obciążenie niszczące element kompozytowy [98]. Autor rozprawy przeprowadził badania na próbkach wykonanych z materiału kompozytowego, aby stwierdzić, czy w badanym materiale występuje efekt Kaisera, czy efekt Felicity. Wynik badań jednej z próbek, reprezentatywny dla badanego materiału pokazano na Rys. 22. Badany kompozyt był wykonany z włókien





Rys. 22. Zależności czasowe siły obciążającej próbkę kompozytową w trakcie pierwszego ( $F_1$ ) i drugiego ( $F_2$ ) procesu jej obciążania oraz wartości szczytowe sygnału EA w trakcie pierwszego ( $U_1$ ) i drugiego ( $U_2$ ) procesu obciążania próbki. Jedna działka na osi siły jest równa 50 N, natomiast działka na osi napięcia szczytowego mierzonego sygnału EA jest równa 400 mV przy 40 dB wzmocnienia sygnału.

węglowych i matrycy z żywicy epoksydowej. Próbkę miały wymiary 60 X 40 X 5 mm i były obciążane metodą zginania trójpunktowego. W trakcie pomiaru co 10 milisekund mierzono wartość szczytową sygnału EA. Sensor EA był typu rezonansowego, częstotliwości środkowej 500 kHz, wzmocnienie w torze pomiarowym wynosiło 40 dB. W trakcie pierwszego cyklu obciążania próbki (pokazanego na górnej części Rysunku 22) próbkę obciążono siłą 221 N, nie powodując jej zniszczenia. W trakcie drugiego cyklu obciążania próbki (pokazanego na dolnej części Rysunku 22) znaczący sygnał EA został zarejestrowany po przyłożeniu do próbki siły 206 N. Stosunek podanych wyżej obciążeń próbki wskazuje na wystąpienie efektu Felicity. Wartość współczynnika Felicity wyliczona zgodnie z definicją podaną w niniejszym podrozdziale wyniosła 0,93.

#### 4.6. Pomiary emisji akustycznej w trakcie prób ciśnieniowych zbiorników

Badanie instalacji ciśnieniowych należy do najstarszych obszarów zastosowania metody EA w warunkach przemysłowych. Problemy związane z rozległością tych instalacji stymulowały prace projektowe prowadzące do powstania wielokanałowych analizatorów emisji akustycznej. Oprócz monitorowania prób hydrostatycznych w zbiornikach ciśnieniowych w omawianej grupie zastosowań metody EA należą również [95]:

- monitorowanie instalacji ciśnieniowych w trakcie ich pracy (znormalizowane procedury zostały zatwierdzone przez służby dozoru technicznego w USA, Niemczech, Anglii i w krajach nordyckich),
- nadzór nad instalacjami zagrożonymi korozją naprężeniową,
- badania rurociągów przesyłających gazy pod ciśnieniem,
- lokalizacja nieszczelności w instalacjach ciśnieniowych.

Szczegółowe wyniki badania sygnału EA generowanego w trakcie próby ciśnieniowej zamieszczono w pracy Birchona i in. [69]. Dla potrzeb tego studium badawczego wykonano modelowy zbiornik ciśnieniowy o średnicy 1,6 m, długości 4,3 m i grubości 25 mm, wraz z szeregiem sztucznych wad: nacięciami ścianek, pęknięciami naprężonych mechanizmami śrubowymi oraz piezoelektrycznymi generatorami fali sprężystej. Obiekt poddano kilkunastu cyklom obciążenia do ciśnienia 6,55 MPa.

W wyniku analizy sygnałów EA, rejestrowanych w układzie 16 przetworników typu rezonansowego określono prawdopodobieństwo wykrycia wady materiałowej rozwijającej się w trakcie próby ciśnieniowej i możliwej do weryfikacji metodą ultradźwiękową na 94 %. Omówiona wyżej metodyka badawcza i uzyskane wyniki potraktowano jako wzorcowe w szeregu prac eksperymentalnych, których zestawienie zamieszczono w [68].

W 1979 roku American Bureau of Standards opracowało normę ASTM - STP 697: "Acoustic Emission Monitoring of Pressurized Systems", a w 1985 roku powstała norma dotycząca szerszego pola zastosowań ASTM - STP 569 "Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation". W latach 1978 - 1980 amerykańskie biuro normalizacyjne opracowało kilkanaście dodatkowych norm dotyczących zastosowania emisji akustycznej w badaniach procesów technologicznych. Wyniki badań rurociągów krajowych z zastosowaniem metody EA podano w [86].



Praktyczne wielkości minimalnych wad, możliwych do wykrycia za pomocą metody EA zostały przedstawione dla duralu w [14]. Jako typowe wielkości podano tam długość obserwowanego pęknięcia : 0,7 - 1 mm oraz średnicę źródła w postaci strefy dyslokacji związanych z przekroczeniem granicy plastyczności - 0,3 do 0,9 mm (dla 54 MPa) .

Do oceny stanu technicznego obiektu pracującego pod ciśnieniem stosuje się wykresy sumy zliczeń EA, natomiast wykresy zsumowanej względem czasu wartości skutecznej sygnału EA mają znaczenie pomocnicze i używa się ich jedynie w celu porównania fragmentów wyników z zarejestrowanym przebiegiem rozwoju wad. Pierwszy z omawianych parametrów jest mniej wrażliwy na oddalenie źródła sygnału (wady) od głowicy pomiarowej i bardziej czuły na krótkotrwałe sygnały charakteryzujące pękanie na niewielkich obszarach, natomiast niesie niewiele informacji o energii procesu (rozmiarze wady), natomiast drugi z parametrów jest proporcjonalny do pierwiastka z rejestrowanej mocy sygnału, i w związku z tym jego wartość zależy od odległości sensor - wada.

Przebieg sumy zliczeń w funkcji obciążenia ma postać następującą. Na początkowym odcinku (ciśnienie niższe od roboczego) suma zliczeń ma pomijalną wartość ( do 10% sumy całkowitej). Na odcinku następnym , obejmującym ciśnienie robocze można zaobserwować odcinek wzmożonej aktywności akustycznej zbiornika. Źródłem emisji akustycznej są tu procesy zmiany kształtu zbiornika i naprężania się połączeń konstrukcyjnych. Proces ten powinien się zakończyć przed osiągnięciem ciśnienia próby. Podczas dalszego zwiększania ciśnienia (kolejne 40 - 50% obciążania) przyrosty zliczeń EA powinny być zerowe lub wyraźnie niższe od poprzedniej fazy. Dopuszcza się w trakcie tego odcinka przyrost nie większy niż 60 % zliczeń zarejestrowanych w trakcie procesu wstępnego naprężania się konstrukcji. Krótkotrwałe wzrosty mające wartość powyżej podanej wymienianych 60 % świadczą o rozwoju wady. Dopuszczalne są znaczące wzrosty EA w trakcie chwilowego obniżania ciśnienia (do którego może dojść wskutek niedoskonałości użytej pompy).

W badaniach serii zbiorników o identycznym kształcie jako wzorcem należy się posługiwać zapisem emisji akustycznej otrzymanym przy badaniu jednego z egzemplarzy , którego stan techniczny zweryfikowano poprzez doprowadzenie do zniszczenia i oględziny struktury. Aktywność akustyczna innych egzemplarzy z tej samej serii powinna mieć taki sam przebieg - bez występowania dodatkowych obszarów wzrostu EA ponad 60 % zliczeń zarejestrowanych w trakcie wstępnego obciążania zbiornika. Norma ASTM STP - 569 (1985) podaje następujące kryteria analizy przebiegu sumy zliczeń EA (należy tu pominąć typowy dla zbiorników odcinek wstępnego naprężania) :

- emisja od źródła aktywnego ma miejsce wówczas, gdy w trakcie wzrostu obciążenia lub przystanku suma EA wzrasta w sposób jednostajny nie przekraczając za dany odcinek wielkości krytycznych podanych wyżej,
- emisja od źródła intensywnego ma podobny przebieg ale w rozpatrywanym przedziale przekraczane są wielkości krytyczne,
- źródło krytycznie aktywne i krytycznie intensywne charakteryzuje się wyraźnym stopniowym powiększaniem rejestrowanych przyrostów sumy EA w jednakowych odcinkach czasu.



Występowanie źródła aktywnego nie powoduje odrzucenia zbiornika, jest to przejaw typowych procesów deformacyjnych. Intensywna lub krytyczna EA jest wynikiem występowania wady, której wyróżnienie możliwe jest przy użyciu dodatkowych metod, jednakże charakter przebiegu EA dla typowych wad jest podobny. W przypadku stwierdzenia zauważalnego i systematycznego wzrostu wskazań liczników EA (źródło krytyczne aktywne/intensywne) zalecane jest przerwanie próby ciśnieniowej.

Ostateczną opinię na temat stanu technicznego badanego zbiornika wydaje się na podstawie analizy wyników uzyskanych dwiema różnymi metodami badawczymi. Oprócz metody EA należy zastosować badania ultradźwiękowe i, w miarę możliwości, oględziny endoskopowe. Wykrycie źródła intensywnego lub krytycznego w oparciu o badania metodą EA stanowi przesłankę do określenia zbiornika jako niesprawnego.

Autor rozprawy przeprowadził pomiary EA w trakcie próby ciśnieniowej cienkościennego zbiorników z duralu [41]. Zbiorniki te miały średnicę 1000 mm, długość całkowitą 2000 mm, grubość 5 mm oraz typowy kształt walca z półsferymi dospawanymi na obu końcach. W trakcie próby ciśnieniowej prowadzono rejestrację EA w sześciu kanałach pomiarowych.

Dwa przetworniki o częstotliwości rezonansowej 500 kHz i numerach 1 i 2 umieszczono na wierzchołkach półsfery, pozostałe cztery (o identycznych parametrach) - równomiernie w środkowej części zbiornika, przy czym przetwornik nr 3 znajdował się w pobliżu doprowadzenia cieczy. Analizator EA rejestrował w pamięci komputera typu IBM PC 486 co jedną sekundę tempo zliczeń i wartość skuteczną sygnału EA mierzone we wszystkich kanałach oraz chwilową wartość ciśnienia przekazywaną z przetwornika tensometrycznego umieszczonego w przewodzie doprowadzającym. Obciążanie zbiorników prowadzono poprzez ręczne podnoszenie ciśnienia wody przegotowanej pompą tłoczącą. Nadciśnienie robocze dla badanej konstrukcji zbiorników wynosiło 0,1 MPa, nadciśnienie próby - 0,3 MPa. Zmierzone sumy zliczeń w sześciu kanałach zbiornika sprawnego i w kanale nr 1 zbiornika uznanego za niesprawny są następujące :

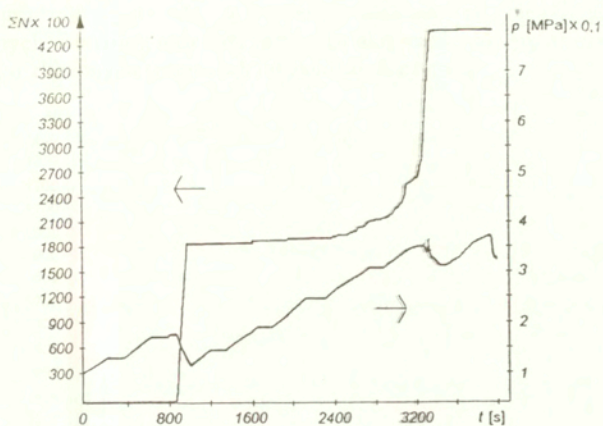
*zbiornik uznany za sprawny technicznie*

- kanał 1 - 1.844.000 zliczeń
- kanał 2 - 3.475.000 zliczeń
- kanał 3 - 8.315.000 zliczeń *(sensor umieszczony w pobliżu przewodu wlotowego)*
- kanał 4 - 4.967.000 zliczeń
- kanał 5 - 3.911.000 zliczeń
- kanał 6 - 2.260.000 zliczeń

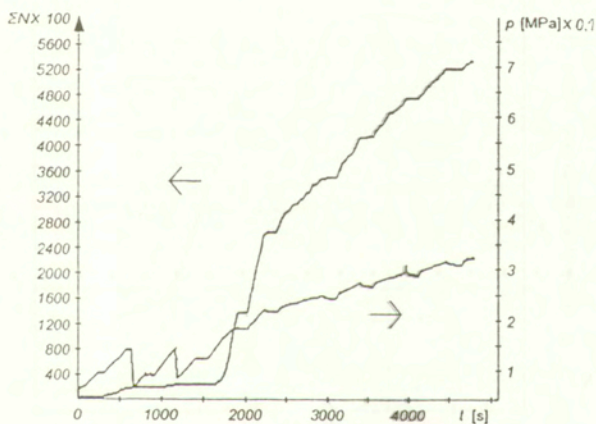
*zbiornik uznany za niesprawny technicznie*

- kanał 1 - 2.224.000 zliczeń

Różnice w zmierzonych sumach zliczeń w odpowiednich kanałach zbiornika sprawnego (1844000) i niesprawnego (224000) nie są znaczące wobec pokazanych wyżej różnic wynikających ze zróżnicowanego układu źródeł EA, działających w poszczególnych obszarach tego samego zbiornika. Istotny jest natomiast charakter zależności sumy zliczeń od czasu.



Rys. 23. Wykres czasowy sumy zliczeń EA i ciśnienia w zbiorniku sprawnym technicznie, w trakcie próby ciśnieniowej



Rys. 24. Wykres czasowy sumy zliczeń EA i ciśnienia w zbiorniku z defektami połączeń spawanych, w trakcie próby ciśnieniowej

Na Rysunkach 23 i 24 przedstawiono charakterystyczne przebiegi obciążania i aktywności akustycznej, zarejestrowane w pierwszym kanale pomiarowym w trakcie próby ciśnieniowej omawianych zbiorników. Przebieg krzywych jest zbliżony dla wszystkich kanałów pomiarowych. Nadciśnienie podnoszono z prędkością 10 kPa/min, przy czym w trakcie próby przeprowadzono kilka dekompresji w celu zarejestrowania aktywności akustycznej zbiornika przy spadku naprężenia jego ścian. Rys.23 przedstawia wynik próby zbiornika kwalifikującego się do dalszej eksploatacji. Suma zliczeń EA po początkowym wzroście spowodowanym rozszerzaniem się zbiornika stabilizuje się na stałej wartości. Rys. 24. przedstawia odmienną sytuację. Wskutek istnienia wad materiałowych w obszarze połączeń spawanych po przekroczeniu ciśnienia 0.1 MPa natężenie sygnału EA gwałtownie rośnie. Zjawisko to utrzymuje się aż do przerwania procesu obciążania. Źródłem tego efektu jest rozwój mikropęknięć w obszarze wad spawów, potwierdzony metodami metalograficznymi, przeprowadzonymi po zakończeniu próby ciśnieniowej.



## 5. IDENTYFIKACJA ŹRÓDEŁ SYGNAŁU EA

### 5.1 Metody klasyfikacji sygnału EA.

W Rozdziale 3 opisano deskryptory sygnału EA. Istnieje kilkadziesiąt tych parametrów opisujących różne własności sygnału. W niniejszym Rozdziale przedstawione zostaną dwie z najczęściej stosowanych metod klasyfikacji sygnału EA, w których wiele cech charakterystycznych sygnału jest integrowanych w celu określenia pojedynczego parametru opisującego sygnał EA.

W latach siedemdziesiątych wprowadzono metodę klasyfikacji sygnału EA, opartą na konstrukcji wektorów cech (ang. feature vectors) [35]. Zbiory wektorów cech, będące w istocie zbiorami wartości zmierzonych deskryptorów EA dla różnych źródeł tego sygnału tworzą wzorce sygnału (ang. patterns), będące punktem wyjścia procedur klasyfikacji na grupy sygnałów pochodzące z konkretnych źródeł. Istota procedur rozpoznawania wzorców (ang. pattern recognition) polega na określeniu różnicy pomiędzy wektorem cech  $X = (x_1 \dots x_n)$  analizowanego sygnału oraz wektorami cech znanych klas sygnałów  $W^1 \dots W^n$  w uogólnionej przestrzeni wektorów cech. Pojęcie uogólnionej przestrzeni wektorów cech zostało przejęte ze statystyki klasycznej [51]. Zakwalifikowanie wektora cech  $X$  do konkretnej klasy  $W$  odbywa się na podstawie kryteriów podobieństwa wektorów cech, z których kryterium podstawowym jest minimalna uogólniona odległość  $D_{min}$  pomiędzy wektorem  $X$ , a jednym z wektorów  $W$ . Uogólnioną odległość  $D$  wektora  $X$  od  $i$ -tego wektora  $W^i$  można opisać wzorem

$$D^i = ((x_1 - w^i_1)^2 + \dots + (x_n - w^i_n)^2)^{1/2} \quad (31)$$

gdzie:  $x_1 \dots x_n$  - wartości zmierzonych deskryptorów, odpowiadające współrzędnym wektora cech dla klasyfikowanej próbki sygnału,  $w_1 \dots w_n$  - wartości ustalonych deskryptorów, będące współrzędnymi wektora cech  $i$ -tego wzorca klasy sygnału EA.

Istotnym zagadnieniem przy klasyfikacji próbek sygnałów metodą pattern recognition jest optymalne określenie współrzędnych wektorów cech na podstawie pomiarów sygnałów wzorcowych. Jedną z metod służących temu celowi jest poddanie próbek sygnałów wzorcowych liniowej filtracji, opartej na modelu autoregresji [62]. Inną stosowaną metodą jest poddanie wzorcowego zbioru próbek sygnału uśrednieniu i normalizacji przy zachowaniu kryterium jednakowego odchylenia standatrowego dla zbiorów próbek sygnału wykorzystywanych do tworzenia kolejnych wektorów cech [85].

Metoda rozpoznawania wzorców jest przez niektórych autorów [37] krytykowana. Istotnym zarzutem, który można wobec niej wysunąć wynika z przesłanek metodologicznych: procedura określania minimalnej odległości w uogólnionej przestrzeni cech należy do grupy klasyfikatorów liniowych. W pracy [59] wykazano istnienie klas wektorów w takiej przestrzeni, wobec których zawodzi procedura klasyfikacji liniowej. W ostatnich latach rośnie zainteresowanie grupą algorytmów, w ramach której uogólniona przestrzeń cech podlega przekształceniom nieliniowym, określana jako metoda nieliniowych

obliczeń metodą sieci neuronowych ( ang. *non - linear network computation*). W literaturze polskiej obszernie omówienie tej metody można znaleźć w monografii [91].

Pierwsze artykuły z dziedziny analizy sygnału EA z wykorzystaniem metody sieci neuronowych opublikowali Grabec i Sachse [78] w 1988 roku, wskazując na użyteczność omawianej metody do celów filtracji sygnału i lokacji jego źródeł. W pracy [100] z 1991 roku udoskonalono procedurę lokacji i rekonstrukcji funkcji źródła EA, lecz do chwili obecnej jest bardzo niewiele publikacji dotyczących praktycznych zastosowań sieci neuronowych do analizy sygnałów EA.

## 5.2 Klasyfikacja rzeczywistych źródeł EA z zastosowaniem sieci neuronowych

W celu zbadania możliwości zastosowania metody obliczeń neuronowych do klasyfikacji źródeł EA autor zbadał zbiór próbek sygnałów EA, generowanych przez próbki betonowe, poddane naprężeniom termicznym [82]. Do badań przygotowano pięć kompozycji betonowych. Parametry tych kompozycji są zamieszczone w Tabeli 9.

Tabela 9. Parametry fizyczne i strukturalne kompozycji betonowych użytych do badań

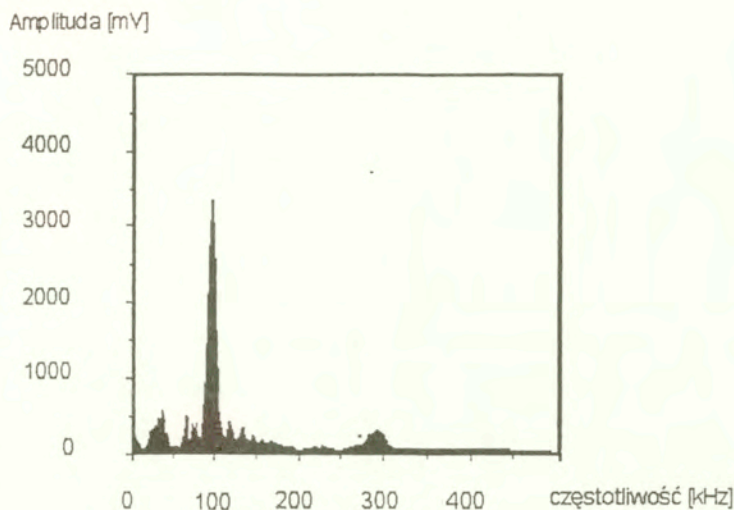
Nr serii	gęstość pozorna [Tm <sup>-3</sup> ]	gęstość właściwa [Tm <sup>-3</sup> ]	porowatość [%]	stosunek wody do cementu	stosunek kruszywa do cementu	stosunek piasku do cementu	wytrzymałość na ściskanie [MPa]
0	1,20	1,67	34,2	0,4	0	0	48,0
I	2,129	2,559	16,8	0,4	0,45	2,2	43,0
II	2,096	2,560	18,12	0,5	0,33	3,0	37,5
III	2,075	2,564	19,07	0,6	0,23	4,3	23,0
IV	2,054	2,565	19,92	0,65	0,20	5,0	21,8

Użyto cementu portlandzkiego marki "35". Wszystkie próbki miały wymiary 4 X 4 X 14 cm, przy czym seria 0 wykonana została z matrycy cementowej, a pozostałe - z betonów o konsystencji gęstoplastycznej.

Wszystkie próbki były kolejno ogrzewane w piecu elektrycznym z termoregulacją do temperatury 150 ° C przez 2 godziny. Następnie, po wyjęciu z pieca, poddawano je chłodzeniu z owiewem powietrza wymuszonym przez wentylator. W czasie pierwszych 20 minut chłodzenia rejestrowane były sygnały emisji akustycznej. Po tym czasie temperatura próbek osiągała temperaturę otoczenia. W odległości 5 cm od krawędzi podstawy próbki mocowano czujniki temperatury, a 3 cm od krawędzi podstawy - szerokopasmowy przetwornik sygnału EA produkcji Physical Acoustic Corp., typu WD. Przed pomiarami określono poziom sygnału EA generowanego samoistnie przez ten przetwornik w trakcie procesu ochładzania. Sygnały EA z przetwornika odbiorczego były transmitowane do przedwzmacniacza i wzmacniacza znajdującego się w analizatorze emisji akustycznej. Odfiltrowany z niskoczęstotliwościowych składowych wibroakustycznych (do 25 kHz) i wzmocniony o 60 dB sygnał podawany był na szybki oscyloskop z pamięcią cyfrową typu



IWATSU DS 6612C. Częstotliwość próbkowania sygnału wynosiła 2 MHz. Układ wyzwalający oscyloskopu umożliwiał rejestrację próbki sygnału o czasie trwania 500  $\mu$ s w chwili gdy poziom tego sygnału przekroczył 0,1 V. 118 takich próbek sygnału było przechowywanych w pamięci półprzewodnikowej oscyloskopu a następnie transmitowanych do pamięci komputera typu PC. Zarejestrowane w opisany wyżej sposób próbki sygnałów EA zostały następnie użyte w procesie uczenia sieci neuronowej, co opisano dalej. Uśrednione ze 100 próbek charakterystyki widmowe kompozycji oznaczonych jako "0", "II" i "IV" pokazano na Rys. 25 - 27.

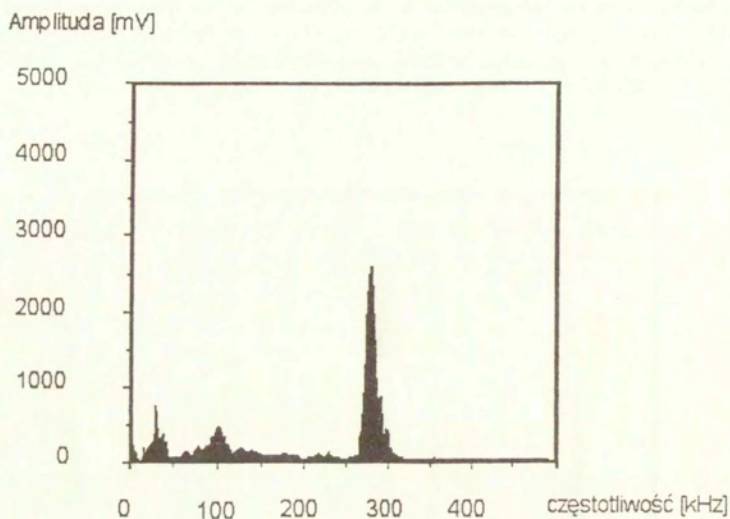


Rys. 25. Uśredniona charakterystyka widmowa próbek betonowych serii "0".

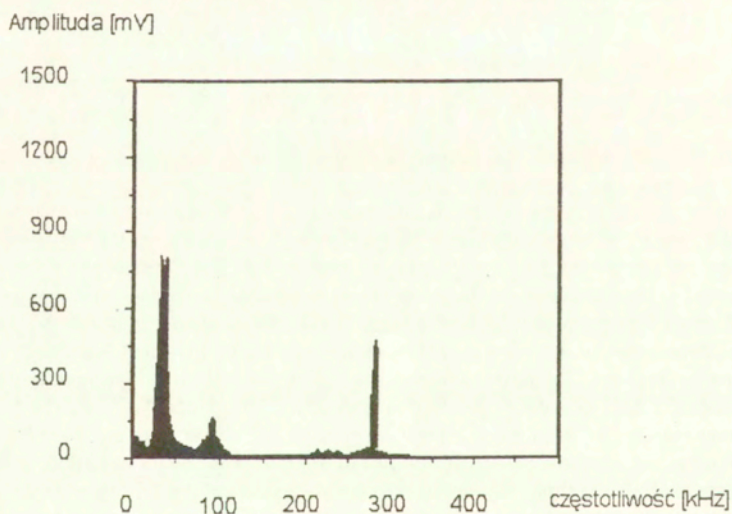
Charakterystyczny rozkład maksimów widmowych, odmienny dla każdej z badanych kompozycji pozwala na powiązanie tych maksimów z konkretnymi procesami zachodzącymi w trakcie procesu wychładzania próbek. Zaczyn cementowy (oznaczony w Tabeli I jako seria "0"), odznaczający się najwyższą wytrzymałością na ściskanie, charakteryzuje się impulsami EA o największej amplitudzie - czterokrotnie wyższej od najsłabszej serii IV. Brak kruszywa w zaczynie powoduje bardzo wysoką wartość skurczu w procesie hydratacji i powstawanie porów o znacznych rozmiarach (porowatość 34%). Struktura zaczynu umożliwia rozwój stosunkowo duużych pęknięć (całkowity brak hamowania na kruszywie). Składowe widm o częstotliwości ok. 100 kHz, dominujące w serii "0" można zatem przypisać procesowi inicjacji i propagacji pęknięć w samym zaczynie cementowym. W kompozycji betonowej serii "I" obserwuje się również dużą aktywność akustyczną i wysokie wartości amplitud sygnału EA. Mała zawartość piasku i kruszywa oraz przebieg widma EA sugerują, że w tej kompozycji również dominują pęknięcia w spoiwie cementowym. Jednocześnie w widmie rośnie udział składowych z



przedziału 280 kHz, charakterystycznych dla kompozycji w których udział kruszywa i związanych z tym procesów hamowania rozwoju rys na kruszywie - jest bardziej znaczący. Ze wzrostem udziału kruszywa zaczyna dominować odmienny mechanizm pęknięcia materiału.



Rys. 26. Uśredniona charakterystyka widmowa próbek betonowych serii "II".



Rys. 27. Uśredniona charakterystyka widmowa próbek betonowych serii "IV".

W miejsce jednej rysy o znacznych wymiarach pojawia się system drobnych rys. Zmniejszenie się rozmiarów źródła sygnału EA powoduje podwyższenie się częstotliwości generowanego sygnału. Zaprawy serii "III" i "IV" charakteryzują się podwyższoną zawartością piasku w stosunku do cementu a zatem bardziej gruboziarnistą strukturą. W zaprawach tych dominują procesy pęknięcia na granicy kruszywo - spoiwo cementowe. Źródła EA związane z tymi procesami charakteryzują się niskimi amplitudami i energiami, a składowe widmowe odpowiadające tym procesom leżą poniżej 100 kHz. Opisane wyżej zależności charakterystyk widmowych od rodzaju procesów pęknięcia struktury betonowej zgodne są z obserwacjami mikroskopowymi i badaniami, opisanymi w [3].

Autor pracy opracował program komputerowy umożliwiający porównywanie próbki sygnału EA z pięcioma wektorami cech, przechowywanymi w specjalnej strukturze, będącej częścią sieci neuronowej. W tym celu w pamięci komputera została zaimplementowana struktura złożona z jednostek zwanych neuronami, które z kolei są ułożone w zespoły zwane warstwami. Każdy z neuronów warstwy poprzedzającej ma kontakt z neuronami warstwy następnej. Sygnał badany podawany jest na warstwę wejściową a następnie poprzez połączenia międzyneuronowe propaguje się do warstwy wyjściowej. Jeżeli na wejściu danej warstwy zostanie podany sygnał  $X$ , który w naszym przypadku jest wektorem cech próbki sygnału EA, to na neuronach tej warstwy pojawi się sygnał  $Y$ :

$$Y = W * X \quad (32)$$

gdzie:  $X, Y$  są wektorami,  $W$  jest macierzą odwzorowania  $X$  w  $Y$ , natomiast  $*$  oznacza nieliniową operację odwzorowania, związaną z funkcją aktywacji, opisaną niżej.

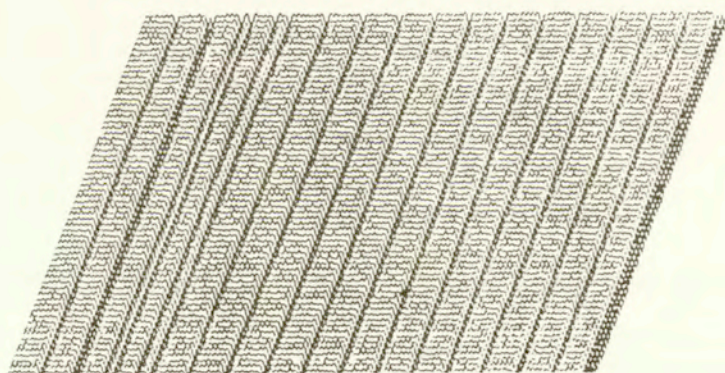
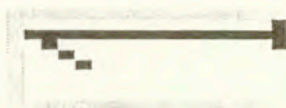
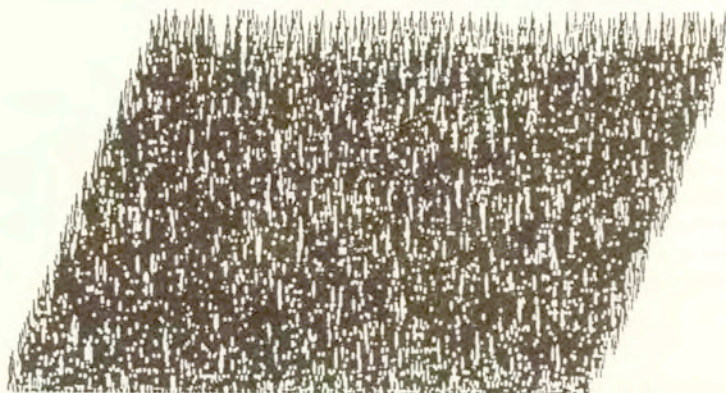
Cechą sieci neuronowej jest możliwość *autonomicznej* modyfikacji swojej organizacji, czyli zmiany macierzy współczynników  $W$ . Macierze  $W$  są w nomenklaturze neuronowej określane jako "tablice wag" połączeń między kolejnymi warstwami. W procesie *zapamiętywania* zadanych wzorców dochodzi do modyfikacji wartości tablic wag w ten sposób, aby przy podaniu na wejście wektora danych na wyjściu otrzymać wektor będący miarą podobieństwa badanego zbioru danych do *ustalonego wcześniej wektora wzorcowego zapamiętanego w tablicach wag*. Proces zapamiętywania (jednego lub kilku) wzorców odbywa się automatycznie przy wykorzystaniu algorytmu iteracyjnego. Rozważając wektory danych przetwarzanych w sieci jako ciągi *bitów*, można zależność pomiędzy sygnałem na wejściu pojedynczego neuronu a sygnałem na jego wyjściu zapisać jako:

$$y_i(t-1) = \theta \left( \sum_j w_{ij} y_j(t) - \mu_i \right) \quad (33)$$

gdzie:  $\theta$  - funkcja aktywacji  $\left\{ \text{w oprogramowaniu opracowanym przez autora pracy użyto sigmoidy } 1 / (1 + \exp(-x)) \right\}$   
 $w_{ij}$  - waga połączenia  $i$ -tego neuronu z  $j$ -tym  
 $\mu_i$  - próg zadziałania neuronu  $\left\{ \text{w omawianym oprogramowaniu } = 0 \right\}$



- prążki widmowe analizowano pod względem amplitudy z rozdzielczością co 6 dB na ośmiu poziomach,
- użyta sieć neuronowa posiadała 248 wejść bitowych do kolejnego wczytywania danych odpowiadających wysokości prążków widmowych,
- z wejść bitowych sygnał był podawany na 62 neurony warstwy ukrytej a następnie na pięć neuronów warstwy wyjściowej, odpowiadających pięciu wzorcom struktur,
- tablice wag, pamiętające wzorce sygnałów liczyły ponad 15 tysięcy zmienno-przecinkowych liczb czterobajtowych.



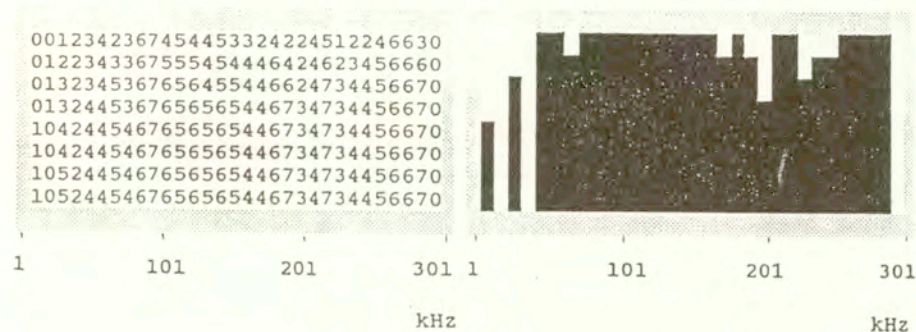
Rys. 29. Badanie procesu zmiany wag warstwy ukrytej sieci zaprojektowanej przez autora. Na górze - początkowy (losowy) stan wag. W środku - modelowy wzorec zastosowany do uczenia sieci. Na dole - wagi po zakończeniu procesu uczenia sieci.



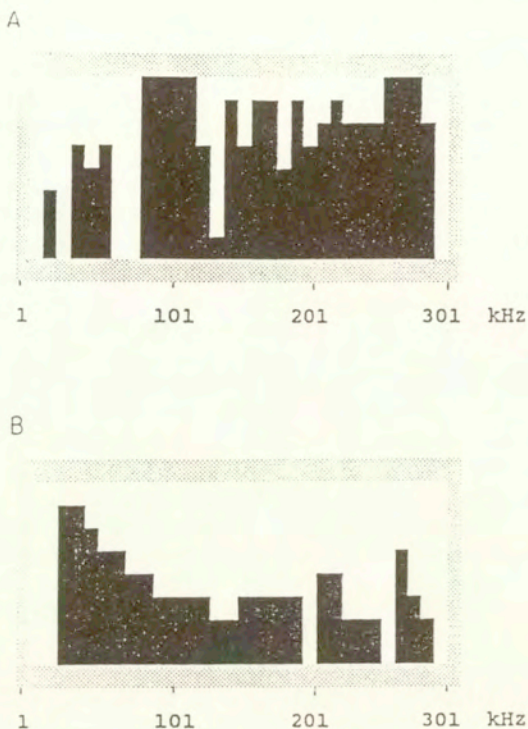
Oprogramowanie zaprojektowane przez autora pracy zostało wyposażone w procedury graficznego obrazowania i drukowania wartości wag w procesie uczenia. Obserwacja zmian wartości wag jest pomocna w kontroli efektywności procesu zapamiętywania wektorów wzorcowych. Ze względu na dużą liczbę jednostek przetwarzających informację (neuronów) i losowe ustawienie wag przed procesem uczenia, każdy z procesów uczenia przebiega autonomicznie w sposób praktycznie niepowtarzalny. Na Rys 29. przedstawiono graficzne zobrazowanie wartości wag połączeń warstwa wejściowa - warstwa pośrednia przed procesem uczenia, modelowy wzorec użyty do uczenia sieci oraz stan wag po zakończeniu procesu uczenia. W przypadku zastosowania nieskomplikowanego wzorca bitowego na zobrazowaniu wag można dostrzec odwzorowanie zastosowanego wzorca.

Liczba 62 neuronów w warstwie ukrytej wynikała z konieczności zabezpieczenia się przed możliwym "przeciążeniem informacyjnym" jednostek neuronowych, opisanym w [36]. Pięć neuronów w warstwie wyjściowej odpowiada pięciu kategoriom wyróżnianym przez sieć.

Uśrednione wzorce do nauki sieci zostały przygotowane w sposób następujący. Dla każdej z badanych struktur wybrano 7 najbardziej typowych sygnałów EA. Następnie wyznaczono ich widma przy zastosowaniu rozdzielczości zgodnej z parametrami sieci, t.j. 31 prążków o ośmiostopniowej gradacji. Siedem zebranych rozkładów widmowych zobrazowano na jednym wykresie z uwzględnieniem częstości wystąpień poszczególnych natężeń tak jak to pokazano na lewej części Rys. 30. W oparciu o takie modele wyznaczono typowe kształty widma z uwzględnieniem obserwowanych odchyłeń od średniego widma. Przyjęto, że typowy kształt widma to przebieg będący sumą elementów przebiegów użytych do wspólnego zobrazowania, jeśli dany element występuje w conajmniej trzech z siedmiu przebiegach. Prawa część Rys. 30. pokazuje wynikowy uśredniony wzorec widmowy dla serii "0" badanych próbek, natomiast Rys. 31 A , B - uśrednione wzorce dla kompozycji " II i " IV " .



Rys. 30. Częstości wystąpień elementów charakterystyki widmowej, pokazanej na Rys.25 dla siedmiu próbek sygnału (z lewej). Z prawej - Dyskretny wzorec tej charakterystyki użyty do uczenia sieci neuronowej.



Rys. 31. Wzorce charakterystyk widmowych, pokazanych na Rys.26 (na górze) oraz na Rys. 27 (na dole), użyte do uczenia sieci neuronowej.

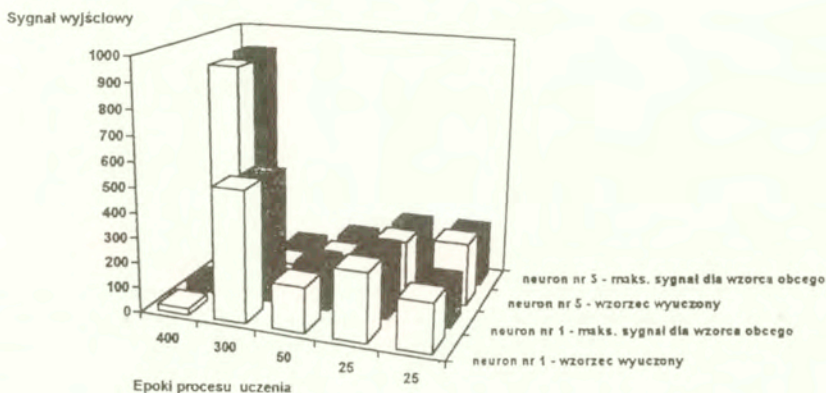
Proces uczenia sieci neuronowej metodą wstecznej propagacji błędów jest - w porównaniu do innych stosowanych metod uczenia sieci [36] - relatywnie powolny, przy czym wada ta traci na znaczeniu w przypadku użycia komputerów o dużej prędkości obliczeń. Do zalet przyjętego algorytmu można zaliczyć jego prostą formułę definiującą i możliwość łatwej modyfikacji w razie konieczności rozszerzenia rozmiaru badanego wektora danych oraz jego własność liniowego narastania liczby operacji wykonywanych w procesie uczenia wraz ze wzrostem liczby połączeń w sieci. Opisywane oprogramowanie było wykorzystywane na komputerze z procesorem 486 DX o częstotliwości zegara 40 MHz. Jeden iteracyjny cykl uczenia trwał 0.3 sekundy, a cała procedura uczenia wszystkich wzorców - około 100 minut. Proces porównania wektora danych z wyuczonym uprzednio wzorcem trwał poniżej jednej sekundy.

Procedurą uczenia sieci polegała na stosowaniu serii powtórzeń algorytmu opisanego formułą (34) kolejno dla pięciu wzorców widm, przy czym sekwencja wzorców widm była



zmieniana, ponieważ w trakcie uczenia kolejnego wzorca poprzednie wzorce były w pewnym stopniu "zapominane". W trakcie tej procedury starano się skojarzyć sygnał wyjściowy każdego z pięciu neuronów ostatniej warstwy sieci z jednym z typów sygnału EA. Celem procesu uczenia było osiągnięcie takiego rozkładu wag połączeń neuronowych, aby przy prezentacji sygnału pochodzącego z określonej kompozycji betonowej, neuron skojarzony z tą kompozycją reagował maksymalnym sygnałem na wyjściu.

Na Rys. 32 pokazano na diagramie przestrzennym zmiany sygnału na dwóch z wyjść sieci neuronowej w trakcie procesu uczenia, złożonego z pięciu iteracyjnych serii cykli uczenia. Metodą doświadczalną ustalono następujący przebieg tego procesu : 400 iteracji w pierwszej serii, 300 iteracji w drugiej, 50 iteracji w trzeciej serii, po 25 iteracji w pozostałych seriach. W trakcie procesu uczenia sygnały na neuronach wyjściowych dążyły do poziomu równowagi równego 0,2, który był przekraczany w górę o kilkadziesiąt tysięcy przy prezentacji właściwego wzorca, natomiast przy prezentacji niewłaściwego wzorca sygnał zmniejszał się na danym wyjściu o kilkadziesiąt tysięcy w stosunku do wartości maksymalnej wynoszącej jeden. Na osi pionowej Rys. 32 zobrazowano wartości sygnału wyjściowego dla wybranych neuronów wyjściowych (pierwszego i piątego), na osi poziomej pokazano pięć kolejnych serii cykli uczenia, (epok), natomiast na osi prostopadłej do płaszczyzny rysunku - cztery warianty testu sieci neuronowej : reakcje wybranych neuronów w przypadku podania na wejście sieci wzorca użytego w procesie uczenia danego wyjścia sieci oraz reakcje tych samych neuronów w przypadku podania na wejście sieci wzorca użytego do uczenia innego z wyjść sieci (reakcja na niewłaściwy wzorec).



Rys. 32. Zmiany sygnału wyjściowego w trakcie procesu uczenia sieci neuronowej. Na Rysunku pokazano sygnał generowany podczas prezentacji na wejściu sieci wzorców wuczonych i niewłaściwych dla wybranych neuronów wyjściowych (pierwszego i piątego).



Liczbowe wartości sygnału generowanego na wyjściu sieci i odpowiadające reakcji sieci na pięć typów sygnałów użytych do jej po zakończeniu trzech seriach iteracji (400 iteracji w pierwszej serii, 300 iteracji w drugiej, 50 iteracji w trzeciej serii) pokazano w Tabeli 10.

Tabela 10. Sygnały generowane przez neurony warstwy wyjściowej, będące reakcją na pięć typów wzorców użytych do uczenia sieci - po trzech seriach iteracji

typ wzorca sygnału EA, podanego na wejście sieci	sygnał na wyjściu pierwszego neuronu	sygnał na wyjściu drugiego neuronu	sygnał na wyjściu trzeciego neuronu	sygnał na wyjściu czwartego neuronu	sygnał na wyjściu piątego neuronu
<b>0</b>	0.179	0.184	0.140	0.165	0.114
<b>I</b>	0.179	0.212	0.154	0.177	0.125
<b>II</b>	0.183	0.202	0.169	0.167	0.126
<b>III</b>	0.179	0.205	0.136	0.244	0.135
<b>IV</b>	0.175	0.200	0.137	0.224	0.139

Tabela 11. Sygnały generowane przez neurony warstwy wyjściowej, będące reakcją na pięć typów wzorców użytych do uczenia sieci - po sześciu seriach iteracji

typ wzorca sygnału EA, podanego na wejście sieci	sygnał na wyjściu pierwszego neuronu	sygnał na wyjściu drugiego neuronu	sygnał na wyjściu trzeciego neuronu	sygnał na wyjściu czwartego neuronu	sygnał na wyjściu piątego neuronu
<b>0</b>	0.195	0.236	0.263	0.119	0.211
<b>I</b>	0.186	0.277	0.275	0.130	0.223
<b>II</b>	0.192	0.259	0.311	0.120	0.220
<b>III</b>	0.182	0.202	0.161	0.219	0.221
<b>IV</b>	0.174	0.238	0.210	0.216	0.254

Z danych prezentowanych w Tabeli 10 wynika, że po trzech seriach iteracji prawidłową reakcję na prezentowane wzorce wykazują jedynie neurony: drugi, trzeci i piąty. W dalszym procesie uczenia przeprowadzono trzy cykle iteracji - po 25, 20 i 15 epok, przy czym zawsze jako pierwszego uczono wzorca najlepiej zapamiętanego, aby zminimalizować efekt stopniowego "zapominania" w trakcie uczenia nowych wzorców. W Tabeli 11. pokazano reakcje pięciu neuronów na pięć typów sygnałów użytych do uczenia sieci po sześciu seriach iteracji.

Po zakończeniu sześciu serii iteracji ( w sumie ok. 900 epok uczenia dla każdego z wzorców ) na wszystkich wyjściach sieci pojawiał się sygnał maksymalny przy prezentacji "właściwego" wzorca. Należy podkreślić, że wynik procesu uczenia jest

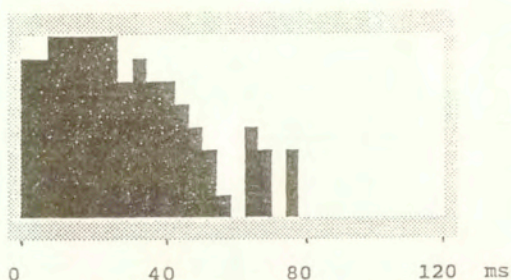
każdorzazowo nieco inny i zależy od początkowego ustawienia wag połączeń, które jest zwykle zadawane jako losowy rozkład liczb z przedziału  $\pm 0.5$ . Po zakończeniu procesu uczenia sieć była testowana sygnałami nie będącymi w zestawie uczącym i różniącymi się od uśrednionych wzorców, chociaż należącymi do odpowiedniego typu. Dla prezentowanych sygnałów typu III sieć rozpoznała ok. 67% wzorców, podczas gdy dla innych typów rozróżnialność wynosiła ok. 60%.

Wyniki uzyskane w trakcie praktycznych testów oprogramowania do obróbki sygnałów emisji akustycznej metodą sieci neuronowej potwierdzają użyteczność zastosowanej metody. Pomimo wyraźnej asymetrii w wartościach osiągniętych na wyjściach sieci (najslabiej reaguje na zmianę wzorców pierwsza jednostka a najsilniej trzecia) - sieć odróżnia charakterystyki widmowe badanych kompozycji betonowych, różniących się wytrzymałością na ściskanie. Odsetek prawidłowo rozpoznawanych reprezentantów danej kompozycji nie przekracza 67% ze względu na rejestrowane różnice wartości gęstości widmowej w poszczególnych próbkach. Opisana metoda może być stosowana przy porównywaniu serii pomiarów dokonanych na określonej strukturze betonowej z kilkoma strukturami wzorcowymi o odmiennych parametrach wytrzymałościowych.

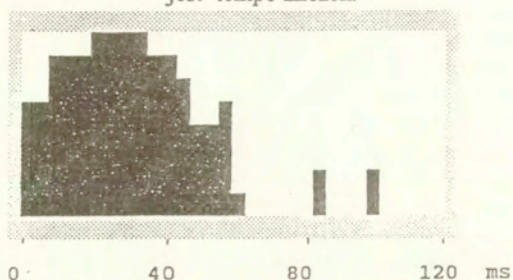
Ten sam algorytm autor zastosował do identyfikacji poziomu mocy lasera na podstawie analizy sygnału EA generowanego przez próbki ceramiczne w trakcie eksperymentów opisanych w paragrafie 4.2. W tym przypadku sieć neuronowa była uczona sekwencjami czasowymi, reprezentującymi wartości tempa zliczeń EA i zarejestrowanymi w trakcie 31 kolejnych cykli pomiaru tego deskryptora, po zakończeniu procesu naświetlania próbki przez laser. Zmierzone wartości tempa zliczeń, reprezentowane w skali logarytmicznej przedstawiono w jednostkach wygodnych do obróbki za pomocą techniki wzorców binarnych - jednostką rozróżnianą przez sieć neuronową były kolejne sześciodecybelowe przedziały wartości tempa zliczeń EA. Każdy z pięciu neuronów warstwy wyjściowej był uczony rozpoznawać jeden z pięciu typów sygnału EA, odpowiadający jednemu z pięciu poziomów mocy lasera, generującego sygnał EA. Kolejne wartości mocy lasera wynosiły: 50, 100, 200, 400 i 1000 watów, przy czasie trwania naświetlania 400 ms. Maksymalny czas trwania sygnału EA, przyjęty do analizy (120 ms) dobrano w ten sposób, że dla 80% eksperymentów rzeczywiste sygnały mieściły się w tej granicy, natomiast w przypadku pozostałych - poziom sygnału poza ustaloną bramką czasową był do pominięcia.

W celu przeprowadzenia testu na rozróżnialność poziomów mocy lasera stosowanych w trakcie badań, zestawiono zestaw danych, pochodzący z innej serii pomiarów. W serii testowej laser generował wiązki o analogicznych mocach, lecz o czasie trwania 200 ms. Na Rysunku 33 pokazano przykładowy wzorzec sygnału, użyty do uczenia sieci, natomiast na Rysunku 34 - wzorzec testowy, zastosowany do sprawdzenia, jak sieć neuronowa rozpoznaje daną kategorię sygnału EA. W Tabeli 12. pokazano reakcje pięciu neuronów na pięć typów sygnałów użytych do uczenia sieci po sześciu seriach iteracji, w których liczba epok była zbliżona do ilości zastosowanej w procedurze uczenia sieci, opisanej wyżej.





Rys. 33. Wzorec sygnału EA, otrzymany poprzez naświetlenie próbki z SiC wiązką lasera o mocy 100 W i czasie trwania 400 ms. Analizowanym parametrem EA jest tempo zliczeń.



Rys. 34. Wzorec sygnału EA, otrzymany poprzez naświetlenie próbki z SiC wiązką lasera o mocy 100 W i czasie trwania 200 ms. Powyższy wzorec został użyty do testu sieci neuronowej, poddanej uprzednio procesowi uczenia za pomocą zbliżonego wzorca sygnału, pokazanego na Rys. 33.

Tabela 12. Sygnały generowane przez neurony warstwy wyjściowej, będące reakcją na pięć typów wzorców użytych do uczenia sieci - po sześciu seriach iteracji. Wzorce sygnału EA zarejestrowane w trakcie badania procesów pęknięcia ceramiki naświetlanej laserem.

moc lasera odpowiadając a sygnałowi EA, podanego na wejście sieci	sygnał na wyjściu pierwszego neuronu	sygnał na wyjściu drugiego neuronu	sygnał na wyjściu trzeciego neuronu	sygnał na wyjściu czwartego neuronu	sygnał na wyjściu piątego neuronu
50 W	0.637	0.179	0.130	0.088	0.109
100 W	0.371	0.572	0.067	0.108	0.113
200 W	0.271	0.044	0.747	0.065	0.098
400 W	0.143	0.115	0.067	0.856	0.034
1000 W	0.120	0.126	0.116	0.038	0.790



W Tabeli 13. pokazano reakcje neuronów warstwy wyjściowej na pięć typów sygnałów testowych, zarejestrowanych w zmienionych warunkach pomiarowych (dwukrotnie krótszy czas naświetlania).

Tabela 13. Sygnały generowane przez neurony warstwy wyjściowej w trakcie prezentacji wzorców testowych, zarejestrowanych w zmienionych warunkach pomiarowych w odniesieniu do danych prezentowanych w Tabeli 11.

moc lasera odpowiadając a sygnałowi EA, podanego na wejście sieci	sygnał na wyjściu pierwszego neuronu	sygnał na wyjściu drugiego neuronu	sygnał na wyjściu trzeciego neuronu	sygnał na wyjściu czwartego neuronu	sygnał na wyjściu piątego neuronu
50 W	0.526	0.107	0.236	0.113	0.082
100 W	0.439	0.087	0.458	0.110	0.079
200 W	0.209	0.151	0.135	0.550	0.037
400 W	0.262	0.111	0.350	0.163	0.117
1000 W	0.292	0.241	0.051	0.464	0.056

Ze względu na silnie nieliniową zależność sygnału EA odpowiadającemu procesom destrukcji w omawianych eksperymentach od wartości energii, wywołującej te procesy destrukcji, osiągnięcie stanu nauczania sieci neuronowej, pozwalającego na wyróżnianie różnych poziomów energii lasera użytych w trakcie eksperymentu zostało osiągnięte jedynie częściowo. W jednym na pięć przypadków analizowania wzorców nie prezentowanych uprzednio sieci został dokonany wybór właściwego poziomu mocy, natomiast w pozostałych przypadkach został wybrany najbliższy sąsiedni (wyższy lub niższy) poziom. Ponieważ sygnały generowane na wyjściach omawianej sieci przybierają wartości z przedziału (0, 1) i nie zawsze obserwuje się wyraźne maksimum sygnału na wyróżnionym wyjściu, interpretacja stanu sieci wymagać może zastosowania reguł logiki rozmytej, co wyczerpująco omówiono w [99].

Stwarza to możliwość określania parametrów użytej wiązki laserowej na podstawie analizy mierzonego sygnału EA, co jest bardzo trudne przy użyciu standartowych metod ze względu na silną zależność zaabsorbowanej energii od zmieniającego się lokalnie współczynnika absorpcji.

## 6. POMIARY I ANALIZA USZNYCH EMISJI AKUSTYCZNYCH

### 6.1 Mechanizm generacji usznych emisji akustycznych

Zjawisko usznych emisji akustycznych związane jest z ludzkim i zwierzęcym narządem słuchu. Pomimo niskoczęstotliwościowego charakteru sygnału, zawierającego się w granicach 0,5 - 5 kHz i nie do końca zbadanego mechanizmu jego powstawania, w piśmiennictwie polskim [54, 74] omawiane zjawisko traktuje się jako jeden z procesów określanych terminem emisja akustyczna. W obrębie omawianego zjawiska rozróżnia się procesy spontaniczne - występujące w dowolnej chwili czasu bez stymulacji z zewnątrz oraz procesy wywołane. Uszne, wywołane emisje akustyczne (ang. Evoked Otoacoustic Emissions - EOAEs) zostały opisane po raz pierwszy przez Kempa w 1978 r. [46]. Efekt ten jest właściwy prawidłowo działającemu ślimakowi uszemu, a jego źródłem są elementy kurczliwe komórek rzęskowych zewnętrznych, znajdujących się na jego błonie podstawnej. Uważa się, że komórki te, pozostające pod kontrolą ośrodkowego układu nerwowego, pełnią ważną rolę we wzmacnianiu i analizie tonalnej odbieranych sygnałów akustycznych [84].

Ponieważ rzęskowe są szczególnie wrażliwe na działanie czynników uszkodzających, takich jak hałas, leki ototoksyczne, drobnoustroje a także ich efektywność z wiekiem ulega osłabieniu, pomiary usznych emisji są prowadzone zarówno w celach badawczych jak i diagnostycznych. Do użytecznych zastosowań klinicznych omawianej metody należą :

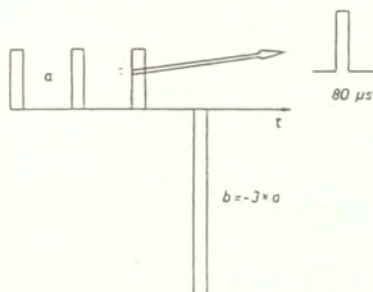
- przesiewowe testy słuchowe u noworodków, wykonywane obecnie na szeroką skalę w krajach anglosaskich [94],
- badanie wad słuchu u dzieci [13],
- diagnostyka przypadków uszkodzeń słuchu związanych z czynnością ślimaka [47].

Spontaniczne, uszne emisje akustyczne (SOAEs) są generowane w postaci sygnałów wolnozmiennych w funkcji czasu, o dyskretnej charakterystyce widmowej, złożonej z jednego lub kilku prążków o poziomie rzędu 20 dB SPL. Rejestrowane są jedynie u części osób ze zdrowym słuchem [49]. Trudności związane z rejestracją SOAEs i jej niejasna etiologia sprawiają, że zjawisko to ma dotychczas ograniczone zastosowanie diagnostyczne.

Rejestracji EOAEs dokonuje się umieszczając czuły mikrofon oraz źródło sygnału akustycznego w zewnętrznym przewodzie słuchowym. Kilka milisekund po wygaśnięciu akustycznego sygnału stymulującego rejestruje się rodzaj "echa", które propaguje się ze ślimaka poprzez kosteczki słuchowe do kanału usznego. Najprostszą metodą rejestracji EOAEs jest cykliczna generacja trzasku o amplitudzie 10 - 40 dB HL i czasie trwania rzędu milisekundy. Rejestrowany sygnał ma niewielki poziom - rzędu 20 dB SPL. W celu poprawienia stosunku sygnał - szum stosuje się wielokrotne pobudzenie ślimaka i rejestrację jego uśrednionej odpowiedzi. W praktyce wykonanie 500 - 1000 kolejnych cykli pomiarowych, trwających po 20 ms pozwala na poprawę stosunku sygnał - szum o ok. 30 dB. Zapis sygnału otrzymanego tą drogą jest określany jako emisja uszna pobudzona clickiem ( ang. *transient evoked otoacoustic emissions* - TEOAEs).



Generacja sygnału EOAEs jest procesem nieliniowym w dziedzinie czasu i w funkcji częstotliwości. Rejestrowany poziom sygnału nie jest proporcjonalny do poziomu wywołującego go clicku. Te charakterystyczne właściwości EOAEs powodują, że zapis usznych emisji wywołanych jest uzupełniony o oscylacje wywołane echem bodźca powstającymi w ślimaku i kanale usznym. Bray i Kemp [46] zaproponowali oryginalną metodę rejestracji EOAEs, prowadzącą do redukcji tych oscylacji. W omawianej metodzie ślimak jest pobudzany kolejno trzema impulsami o dodatniej polaryzacji, a następnie impulsem o polaryzacji ujemnej i trzykrotnie wyższej amplitudzie, jak to pokazano na Rys. 35. Kolejne przebiegi usznych emisji akustycznych, wywołane obu rodzajami bodźców, są dodawane do siebie i uśredniane. Zastosowana procedura ma na celu eliminację składowych liniowych EOAEs, rejestrowanych w przeciwfazie.



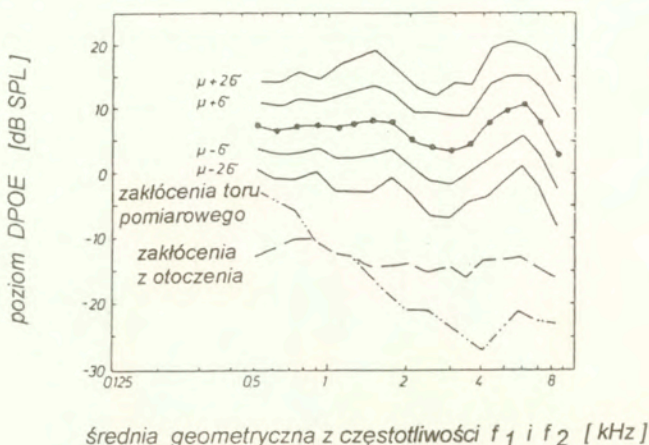
Rys. 35. Układ czterech impulsów pobudzających narząd słuchu, stosowany w celu eliminacji liniowych składowych usznych emisji akustycznych.

Opisany wyżej sposób jest nazywany nieliniowym trybem stymulacji. Sygnał EOAEs zarejestrowany tą metodą charakteryzuje się zmniejszoną ilością oscylacji wywołanych opisanym wyżej zjawiskiem echa. Pogorszeniu ulega natomiast stosunek sygnał - szum, w związku z czym w przypadku niskich amplitud EOAEs, korzystne jest stosowanie łącznie trybu liniowego i nieliniowego.

Zjawisko nieliniowości usznych emisji akustycznych w dziedzinie częstotliwości zostało wykorzystane do kolejnej modyfikacji metody ich rejestracji, dokonanej przez Bray'a i Kempa [47]. Metoda ta nosi nazwę rejestracji produktu dystorsji usznych emisji (ang. *distortion - product otoacoustic emissions*) - DPOEs. W tym przypadku w kanale usznym umieszcza się dwa źródła częstotliwości akustycznych. Dwie częstotliwości,  $f_1$  i  $f_2$  generowane przez te źródła wywołują w komórkach błony podstawnej ślimaka efekty powstawania emisji o pośrednich częstotliwościach. Eksperymentalnie stwierdzono, że w sygnale DPOEs dominuje częstotliwość  $2 \cdot (f_1 - f_2)$ . Zapis DPOEs w funkcji średniej geometrycznej z częstotliwości  $f_1$  i  $f_2$ , zwany "DPOE - gramem" uzyskuje się za pomocą układu elektronicznie przestrajanych generatorów i odbiorczych filtrów wąskopasmowych. Przykład takiego zapisu przedstawiono na Rys. 36.



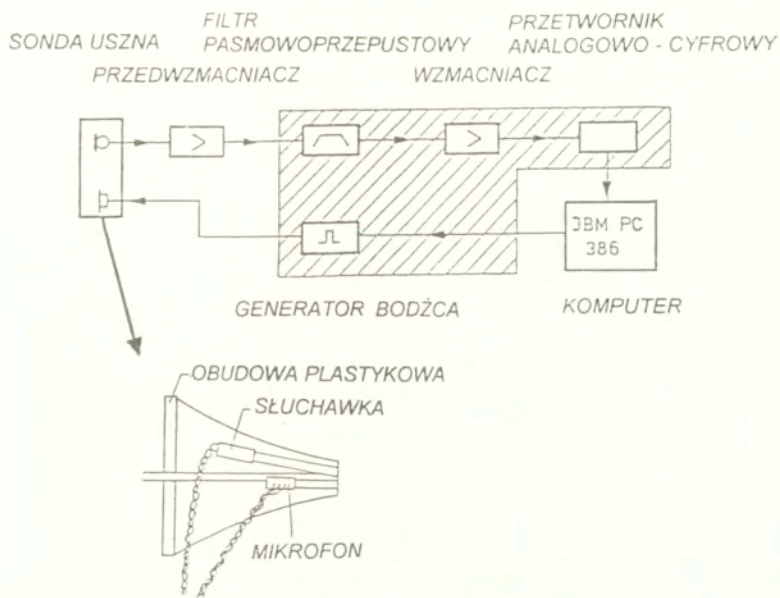
→ średnia z pomiarów w 29 uszach osób dorosłych w wieku 22 - 30 lat



Rys. 36. Średni poziom sygnału DPOE w funkcji średniej geometrycznej z częstotliwości  $f_1$  i  $f_2$  (linia ciągła z kółkami), przedziały odchylenia od poziomu średniego o szerokości jednego i dwóch odchyżeń standardowych oraz poziomy zakłóceń rejestrowane w trakcie pomiaru, wg [88].

## 6.2. Aparatura i pomiary usznych wywołanych emisji akustycznych

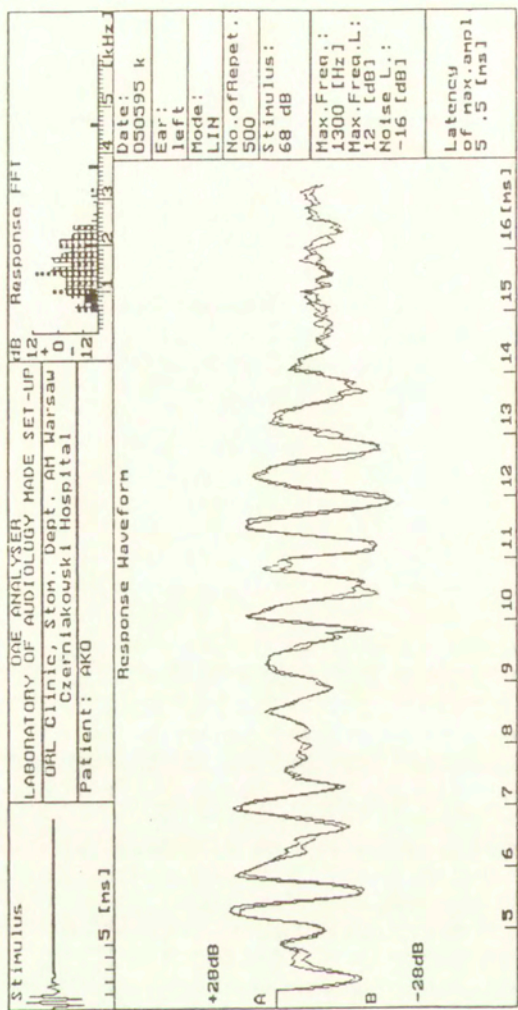
Badania usznych, wywołanych emisji akustycznych są prowadzone w Pracowni Audiologii Kliniki Otolaryngologii Oddziału Stomatologii AM w Warszawie od 1990 roku [5 - 12, 80]. Dla potrzeb tych badań autor pracy zaprojektował oryginalną aparaturę wraz z oprogramowaniem. Omawiana aparatura, umożliwiająca rejestrację EOAEs w trybie liniowym i nieliniowym jest pokazana na Rys. 37. Zastosowano stymulację ślimaka usznego ciągiem impulsów unipolarnych lub bipolarnych o czasie trwania 100  $\mu$ s i regulowanym natężeniu. Impuls generowany jest za pomocą miniaturowej słuchawki, znajdującej się w sondzie umieszczonej w przewodzie słuchowym. Uszne emisje akustyczne rejestrowane są za pomocą miniaturowego mikrofonu, który zamienia je na impulsy elektryczne. Impulsy te mają bardzo niską amplitudę, nie przekraczającą 2  $\mu$ V. Ich obróbka polega na synchronicznym uśrednieniu z tysiąca przebiegów, połączonym z filtracją pasmowoprzepustową. Sygnały EOAEs są zapisywane w pamięci komputera jako ciągi 800 bajtów przy próbkowaniu z częstotliwością 40 kHz. Po zakończeniu rejestracji sygnał EOAEs wraz z jego charakterystycznymi parametrami i danymi o pacjencie jest wyświetlany na monitorze i ewentualnie drukowany. Otrzymany w ten sposób typowy przebieg czasowy sygnału EOAEs, stymulowany clickiem o polaryzacji dodatniej, o natężeniu 40 dB HL jest pokazany na Rys. 38.



Rys. 37. Schemat blokowy analizatora EOAEs, zaprojektowany przez autora.

W centralnej Rysunku 38. przedstawiony jest wykres czasowy dwóch następujących po sobie serii stymulacji. W lewym górnym rogu pokazany jest wykres czasowy uzyskany w trakcie rejestracji bodźca. Ponad centralną częścią obrazu widnieją dane ośrodka wykonującego badanie i kod pacjenta. W prawym górnym rogu znajduje się dyskretne widmo zmierzonego sygnału EOAEs. Jest ono wykreślone za pomocą wykratkowanych słupków. Razem z nimi na ilustracji pokazane są całkowicie zaciemnione słupki pokazujące gęstość widmową szumu towarzyszącego rejestracji EOAEs. W przypadku przekroczenia przez sygnał zakłócający wielkości dopuszczalnej pomiar EOAEs uznaje się za niereprezentatywny. Widmo sygnału zakłócającego jest wyznaczane jako różnica wartości gęstości widmowej sygnału mierzonego w dwóch następujących po sobie seriach pomiarów. Dodatkowo, z prawej strony wykresu czasowego na monitorze wyświetlane są parametry sygnału, które w trakcie pracy badawczej zostały uznane za istotne dla scharakteryzowania zmierzonej usznej emisji akustycznej. Są to :

- poziom zastosowanego bodźca i tryb pomiaru (zastosowanie bodźca unipolarnego lub bipolarnego z redukcją składowej liniowej EOs).
- częstotliwość maksymalnego prążka w widmie i jego poziom.
- poziom prążka maksymalnego dla zarejestrowanego szumu w trakcie pomiaru.
- opóźnienie wystąpienia maksimum sygnału EOAEs względem początku sygnału.



Rys. 38. Typowy przebieg czasowy sygnału usznej, wywołanej emisji akustycznej, wykreślony łącznie jej charakterystycznymi parametrami (opis z prawej strony).

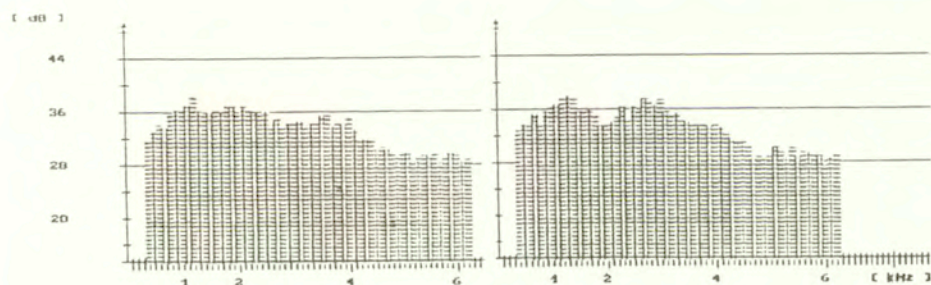


Oddzielne procedury pozwalają na wykreślenie uśrednionego wykresu natężenia sygnału EOAEs w funkcji czasu oraz uśrednionego widma sygnału, w obu przypadkach dla dowolnej wybranej grupy probantów. W badaniach odtwarzalności zapisu EOAEs wykorzystywana jest procedura pozwalająca na wyliczenie współczynnika korelacji wzajemnej pomiędzy dwoma zarejestrowanymi zapisami EOAEs. Działanie tych procedur przetestowano na zgromadzonym zbiorze zapisów EOAEs, uzyskanym poprzez przebadanie 101 studentów stomatologii w wieku od 21 do 26 lat.

Osoby poddane badaniom rozpoczynają pracę obciążoną ryzykiem zawodowym (hałas wiertarki) - dyskutowanym w piśmiennictwie światowym. Opracowany protokół badań stanowił, że probanci przechodzili rutynowe badania otoskopowe i przeglądowe badania audiometryczne. Następnie określano górną granicę słyszenia za pomocą audiometrii wysokoczęstotliwościowej (8 - 18 kHz). W trakcie analizy zarejestrowanych sygnałów EOAEs zbadano różnice zapisów usznej emisji wywołanej osobami zgłaszającymi dyskomfort słuchowy (*hyperacousis*) od zapisów zarejestrowanych u osób nie zgłaszających tego efektu. U osób z *hyperacousis* pogorszeniu progę słyszalności towarzyszy zwiększenie wrażliwości na dźwięki. W przypadku osób o prawidłowym słuchu w zakresie 0.25-8 kHz, *hyperacousis* było odnotowywane, jeżeli w zakresie wyższych częstotliwości próg percepcji pokrywał się z progiem dyskomfortu. Częstotliwości i poziomy, dla których zgłaszano dyskomfort były następujące:

- 16 kHz, poziom 65-100 dB SPL : 5 przypadków,
- 17 kHz, poziom 65-110 dB SPL : 19 przypadków,
- 18 kHz, poziom 65-100 dB SPL : 9 przypadków.

Okazało się, że średnie widmo sygnału EOAEs dla osób z normalnym słuchem różni się od średniego widma osób z *hyperacousis*, co pokazano na Rys. 39.



Rys. 39. Uśrednione widmo EOAEs grupy osób nie zgłaszających dyskomfortu *hyperacousis* (z lewej), z prawej-uśrednione widmo EOAEs grupy osób zgłaszających ten efekt.

Na Rys. 39. z lewej strony pokazano uśrednione widmo (norma) grupy 7 osób, natomiast z prawej strony - uśrednione widmo (*hyperacousis*) grupy 6 osób. Różnice w gęstości widmowej widoczne są zwłaszcza w przedziale 2-3 kHz. Uśrednione widma z Rys. 39. zostały użyte w procedurze uczenia sieci neuronowej, opisanej w Rozdziale 5. niniejszej pracy. Sieć była uczona konfiguracji 31 stuhercowych prążków widmowych. Wysokości prążków były skwantowane co 5 dB na osiem poziomów, co daje 248 elementów użytych do zapamiętania wzorca widma. Użyta kwantyzacja pozwoliła na 100 % odróżnianie sygnałów EOAEs w ramach podanych wyżej grup osób. Obecnie prowadzone są prace mające na celu zbadanie, czy istnieje analogiczna zależność pomiędzy stwierdzonymi nierównomiernościami (załamkami), wykrytymi na krzywych audiometrycznych badanych osób, a przebiegiem sygnału EOAEs, rejestrowanego u tych osób. Test wykorzystujący uszne wywołane emisje akustyczne charakteryzuje się wysoką powtarzalnością w przypadku dokonywania pomiarów u tej samej osoby i dużą zmiennością międzysobniczą. Może zatem również być użyty jako metoda uzupełniająca w trakcie okresowych badań kontrolnych słuchu.

## 7. ZAKOŃCZENIE

W poprzednich Rozdziałach niniejszej pracy autor opisał szereg metod stosowanych w ramach analizy sygnału EA, rejestrowanego w różnych materiałach i elementach technicznych. Przytoczone w pracy praktyczne przykłady powiązania badanych własności materiałowych z parametrami towarzyszącego im sygnału EA są ilustracją zachodzących obecnie procesów rozwojowych, dotyczących wykorzystywanej aparatury i procedur badawczych. Stosowane od dawna procedury analizy przebiegów czasowych tempa lub sumy zliczeń w przypadku rejestracji EA pochodzącej od źródeł dyskretnych oraz wartości skutecznej w przypadku źródeł typu szumowego zostają stopniowo zastępowane procedurami bardziej zaawansowanymi. Wśród tych nowoczesnych procedur obróbki sygnału EA na podkreślenie zasługują :

- równoczesna rejestracja kilku deskryptorów EA ( zliczenia, zdarzenia, wartość skuteczna, wartość szczytowa, suma zliczeń z uwzględnieniem różnych progów dyskryminacji), przy czym czas trwania interwału pomiarowego jest dobierany odpowiednio do ilości zdarzeń EA w jednostce czasu,
- identyfikacja źródła EA na podstawie próbek sygnału ( rekonstrukcja funkcji źródła, analiza widma sygnału, metoda rozpoznawania wzorca na podstawie zbioru deskryptorów z wykorzystaniem metod liniowych i nieliniowych, opisanych w Rozdziale 5),
- wielokanałowa rejestracja sygnałów, pochodzących od złożonych układów wielu źródeł EA.

Zastosowanie zaawansowanych metod rejestracji i obróbki sygnałów EA stało się możliwe dzięki ścisłemu powiązaniu aparatury rejestrującej z komputerowymi systemami obróbki danych pracującymi w czasie rzeczywistym. Konsekwencją wykorzystywania nowoczesnej techniki cyfrowej jest coraz szersze stosowanie zaawansowanych algorytmów dyskretnej obróbki danych, jakimi są : obliczenia neuronowe, systemy ekspertowe wnioskujące w oparciu o logikę stanów rozmytych i programowanie obiektowe.

Jednocześnie przytoczony przegląd literatury potwierdza wzrost obszarów zastosowania omawianej metody. Początkowo sygnały emisji akustycznej rejestrowano w celu oceny własności mechanicznych niewielkiej grupy materiałów (drewno, beton, metale). Obecnie, obok znaczącego powiększenia się tej grupy o materiały kompozytowe, struktury geologiczne i biologiczne, badane są różnorodne przemiany fazowe w ciałach stałych i cieczach oraz różne formy wyładowań elektrycznych.

W tym miejscu autor chciałby naszkicować krótką prognozę dotyczącą kierunków dalszego udoskonalania techniki pomiaru i obróbki sygnału EA. W najbliższych latach należy spodziewać się rozwoju w zakresie konstrukcji sensorów rejestrujących sygnał EA.



Wymagania stawiane przez ciągle doskonaloną aparaturę, zwłaszcza wykorzystującą procedury rekonstrukcji funkcji źródła i rozpoznawanie według wzorca sygnału (opisane w Rozdziałach 2. i 5. ), doprowadzą do powszechnego stosowania czułych sensorów szerokopasmowych, omawianych w paragrafach 1.2 i 2.2 . Ponadto znajdują zastosowanie sensory skonstruowane w oparciu o nowe technologie - liniowe detektory fal sprężystych, oparte na technologii światłowodowej, bezstykowe sensory laserowe i pojemnościowe. Opis bezstykowego pomiaru generacji fal sprężystych w ceramice zamieszczono m. in. w [76].

Problemy związane z analizą złożonego sygnału EA, wynikające z wielokrotnych odbić i transformacji tego sygnału na drodze źródło - sensor stymulować będą dalszy rozwój komputerowych procedur służących identyfikacji i filtracji sygnału. Metody obróbki sygnału, w których wykorzystujące sieci połączonych ze sobą jednostek arytmetyczno - logicznych znajdują zastosowanie w rozbudowanych analizatorach EA, wyposażonych w wiele sensorów i szereg procesorów sygnałowych.

Przytoczone w powyższej pracy modyfikacje aparatury i procedur pomiarowych dokonane przez jej autora były dokonywane w nadziei, że ich konsekwencją będzie zarówno optymalizacja procesów obróbki sygnału EA, jak i ułatwienia umożliwiające ich stosowanie przez coraz szersze grono użytkowników.

## LITERATURA

1. Adamczyk E., Ranachowski J., Ranachowski Z., Szachnowski W : Badanie procesów korozji naprężeniowej stali konstrukcyjnych dla lotnictwa metodą EA. [w:] Elektryczne i akustyczne metody badań materiałów. Materiały z Seminarium w Jabłonce, grudzień 1983, wyd. IPPT, Warszawa, 1984, pp.279 - 288.
2. Adams C. H : On the SPI / CAPP Recommended Practice for Acoustic Emission Testing of Fiberglass Tanks and Vessels. J. of Acoustic Emission, Vol. 1, 1,1982, pp. 165 - 178.
3. Berthelot J.-M., Ben Souda M., Robert J. L. : Frequency Analysis of Acoustic Emission Signals in Concrete, Journal of Acoustic Emission, Vol 11, 1, 1993, pp. 11 - 18.
4. Birchon D., Dukes R., Taylor R. : Acoustic Emission Monitoring of Hydraulically Loaded Experimental Vessels. Inst. Mech. Engineers Conf. Publication, 8, London, 1974, pp. 8 - 28.
5. Bochenek W., Ranachowski Z., Kiciak J., Kukwa A. : Badania usznych emisji akustycznych z zastosowaniem oryginalnej aparatury i metodyki badawczej, Prace IPPT nr20/ 1992, Warszawa 1992.
6. Bochenek W., Ranachowski Z., Kiciak J., Kukwa A., Our first experience with Electrostimulation High - Frequency Audiometry and Evoked Otoacoustic Emissions incorporated into the Hearing Screening Test Battery, Abstracts of the First European Conf. on Audiology, ISSN 0967-6015 British Soc. of Audiology, Cambridge , 1992, 152, submission 104.
7. Bochenek W., Kiciak J., Ranachowski Z.: Computers in acoustic emission processing including otoacoustic emission, Proc. of 6th Int. Fase Congress, Zurich, 1992, pp. 1500-1504.
8. Bochenek W., Ranachowski Z., Kiciak J., Chorzempa A., Kukwa A., Nasze pierwsze doświadczenie z włączeniem elektrostymulacyjnej audiometrii wysokoczęstotliwościowej i wywołanych, usznych emisji akustycznych do baterii przeglądowych testów słuchowych, Otolaryngologia Polska, suppl.14, 1993, pp. 369-373.
9. Bochenek W., Kiciak J., Ranachowski Z. : Audiometrie Haute Frequence par Electrostimulation,sa place parmi les epreuves de balayage.Limitations et avantages, 90e Congres Francais ORL, Paris, Librairie Arnette, 136, 8, 1993, pp. 815-820.

10. Bochenek W., Kiciak J., Ranachowski Z.: Some Clinical and Technical Remarks on Electrostimulation High-Frequency Audiometry and Evoked Otoacoustic Emissions using a laboratory-made set-up. Abstract book of XV World Congress of Otolaryngology, Head and Neck Surgery, Istanbul, June 1993, 154, no.54.
11. Bochenek W., Ranachowski Z., Kiciak J.: Opracowanie dwóch nowych testów audiologicznych: 1. Przeglądowej elektrostymulacyjnej wysokoczęstotliwościowej audiometrii i 2. Rejestracji usznych wywołanych emisji akustycznych jako metod wczesnego ostrzeżenia o upośledzeniu słuchu [w:] Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna. Stan badań w Polsce. Praca zbiorowa pod red. M. Nałęcza, wyd. Instytut Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej, Warszawa, 1994, pp. 68 - 75.
12. Bochenek W., Kiciak J., Kukwa A., Sobotka L., Hatliński J., Ranachowski Z.: Remarks on High - Frequency Audiometry and Evoked Otoacoustic Emissions in at Risk Subjects Screening Using Laboratory Made Set - up. Proc. of European Conf. on Audiology, Noordwijkerhout, The Netherlands, 1995, pp. 64 - 67.
13. Bonfils P., Uziel A., Narcy P.: Apport des emissions acoustiques cochleaires en audiologie pediatrique. Annales Oto - Laryngol., Vol. 105, Paris, 1988, pp. 109 - 113.
14. Buttle D.J., Scruby C.B.: Characterization of Fatigue of Aluminium Alloys by Acoustic Emission, Part I - Identification of Source Mechanism. Journ. of Acoustic Emission, Vol. 9, 4, 1990, pp.243 - 254.
15. Cagniard L.: Reflection and Refraction of Progressive Seismic waves. Mc Graw - Hill Publ., New York, 1962.
16. Ceranoglu A., Pao Y.: Propagation of elastic Pulses and Acoustic Emission in a Plate. Part1: Theory, Part 2: Epicentral Responses, Part 3: General Responses. Journ. of Applied Mechanics, Vol. 48, 1, 1981, pp.125 - 147.
17. Coppola J. A., Bradt R. C.: Thermal shock damage in SiC. J.Amer.Ceram.Soc., Vol.56, 4, 1983, pp. 214-218.
18. D'Attellis C. E., Perez L. V., Rubio D., Ruzzante J. E.: Parameter Estimation in Acoustic Emission Signals. Journal of Acoustic Emission, Vol. 10, 3/4, 1992, pp.13 - 17.
19. Drouillard T.: Acoustic Emission. A bibliography with Abstracts. IFI / Plenum Publ., New York, 1979.
20. Drouillard T.: Anecdotal History of Acoustic Emission from Wood. Journ. of Acoustic Emission, Vol. 9, 3, 1990.



21. Dunnegan H. : Acoustic Emission : A Promising Technique. UC1D - 4643, Publ. of Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, California, 1963.
22. Dunnegan H. : Using Acoustic Emission Technology to Predict Structural Failure. Metals Engineering Quarterly, Vol. 15, 1, New York, 1975, pp.640 - 662.
23. Dunnegan H. : Advances in Acoustic Emission. Dunnegan Endeveco Book Dept., Columbus, 1981.
24. Ewing W., Jardetsky W., Press F. : Elastic Waves in Layered Media, Mc Graw - Hill Publ., New York, 1960.
25. Flaga K., Furtak K. : Wpływ rodzaju kruszywa na poziomy naprężeń krytycznych w betonie ściskanym . Archiwum Inżynierii Lądowej, Vol. 27, 4, Politechnika Krakowska, 1981, pp. 653 - 666.
26. Forster F., Scheil E. : Akustische Untersuchung der Bildung von Martensitnadeln. Zeitschrift für Metallkunde ,Vol 28,9, Berlin ,1936, pp. 245 - 247.
27. Fowler T. J., Gray E. : Development of an Acoustic Emission Test for F.R.P. Equipment, Preprint 3583, Am. Soc. of Civil Eng., New York, 1979.
28. Fowler T., J : Acoustic Emission Testing of Vessels. Chemical Engineering Progress, Vol. 84, 9, Am. Institute of Chemical Engineers, New York, 1988.
29. Frąckiewicz H., Hoffman J., Kalita W., Królikowski J., PileckiS., Ranachowski Z.: Emisja Akustyczna w procesie laserowego kształtowania metali. Prace IPPT, 14/1993,Warszawa, 1993.
30. Funke G., Pawłowski Z. : Emisja akustyczna w badaniach zmęczeniowych stali. Materiały z V Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących w Koszalinie, wyd. IPPT, Warszawa, 1975, p.165.
31. Gołaski L. : Emisja Akustyczna w materiałach złożonych. [w]: Malecki I., Ranachowski J. [red.]: Emisja Akustyczna.Zróżła, Metody, Zastosowania. PASCAL Publications, Warszawa, 1994, pp. 269 - 289.
32. Grabec J., Sachse W. : Application of an intelligent signal processing system to acoustic emission analysis. J. Acoust. Soc. Am. Vol.85, 3, 1989, pp. 1226 - 1235.
33. Harris D.O., Tetelman A.S., Darwish F.A. : Detection of Fibre Cracking by Acoustic Emission. Acoustic Emission, ASTM STP 505, Amer. Soc. for Testing and Materials, Philadelphia, 1972, pp. 238 - 249.

34. Hasselman D.P.H.: Thermal stress crack stability and propagation in severe thermal environments. *Material Science Res.*, Plenum Press, 1971, pp. 89 - 103.
35. Hay D.R., Chan R.W.Y., Sharp D., Siddiqui K.J. : Classification of AE signal from Deformation Mechanisms in Aluminium Alloys. *Journ. of Acoustic Emission*, Vol.3, 3, 1984, pp. 118 - 129.
36. Hertz J, Krogh A., Palmer R. : *Introduction to the Theory of Neural Computation*. Addison - Wesley Publ. Comp., Reading Mass., 1991.
37. Hill R. : *Acoustic Emission - 20 Years of Development*. 14 - th ICA Congress, Beijing, L 1-5, 1992.
38. Hoła J., Moczko A. : *Analiza procesu niszczenia wybranych struktur betonowych przy wykorzystaniu metody ultradźwiękowej i emisji akustycznej*. Praca doktorska. Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1984.
39. Hoła J., Ranachowski Z. : *Metoda emisji akustycznej w zastosowaniu do badania betonu*. Prace IPPT, nr 26, Warszawa, 1991.
40. Hoła J., Ranachowski Z. : *Wykorzystanie metody emisji akustycznej w ocenie wpływu czynników technologicznych i eksploatacyjnych na proces niszczenia betonu*. Prace IPPT, nr 37, Warszawa, 1992.
41. Horos J., Gadaj S.P., Kaczmarek J., Oliferuk W., Pieczyńska E. : *Emisja akustyczna towarzysząca przemianom fazowym w deformowanej stali 1 H18N9T*. Prace IPPT nr 31, Warszawa, 1982.
42. Hsu N., Breckenridge F : *Characterization and Calibration of Acoustic Emission Sensors*. *Materials Evaluation*, Vol.39, 1981, pp. 60 - 69.
43. Jaroszewska A., Kołtoński W. : *Geoakustyka*. [w:] Malecki I., Ranachowski J. [red.]: *Emisja Akustyczna. Źródła, Metody, Zastosowania*. PASCAL Publications, Warszawa, 1994, pp. 323 - 352.
44. Kaiser J. : *Untersuchungen über das auftreten Geräuschen beim Zugversuch*. Ph. D. Thesis, Techn. Hochschule, München, Deutschland, 1950.
45. Karpiniuk P., Pawłowski Z. : *Emisja akustyczna w badaniach zmęczeniowych stali*. Materiały z VII Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, tom 11, wyd. IPPT, Warszawa, 1973, p.211.
46. Kemp D.T. : *Stimulated Acoustic Emission from the Human Auditory System*. *J. Acoust. Soc Am.*, Vol. 64, 4, 1978, pp. 1386 - 1391.

47. Kemp D. T., Bray P. et al. : Acoustic Emission Cochleography - Practical Aspects. J. Scandinavian Audiology, Suppl. no 25, 1986.
48. Knopoff L. : Surface Motions of a Thick Plate. Journ. of Applied Physics. Vol. 29, 4, 1958, pp.661 - 672
49. Kohler K., Fritze W., Frederiksen W. E. : Spontaneous oto-acoustic emissions - comparison of the left versus the right ear. Arch. Otorhinolaryngol., Vol. 243, Goetingen, 1986, pp. 43 - 46.
50. Licht T. :Acoustic Emission. Brüel & Kjaer Technical Review, No. 2 - 1979, wyd. Brüel & Kjaer, Dania, 1979.
51. Mahalanobis P.C. : On the Generalized Distance in Statistics. Proc. Nat. Sci. of India, 122, 1936, pp. 49 -55.
52. Majeed M.A., Murthy C.L. : A Double Exponential Model for AE Signals. Journ. of Acoustic Emission, Vol. 12, 3/4 1994 , pp. 107 - 110.
53. Malecki I. : Fizyczne podstawy akustyki technicznej. wyd.PWN, Warszawa, 1969.
54. Malecki I., Ranachowski J. [red.]: Emisja Akustyczna.Zródła, Metody, Zastosowania. PASCAL Publications, Warszawa, 1994.
55. Mason W., Mc Skimin H., Schockley W : Ultrasonic Observation of Twinning in Tin. Physical Review, Vol, 73, 10, 1948, pp. 1213 - 1214.
56. Meissner M., Ranachowski Z. : Generacja i propagacja wzorcowych impulsów emisji akustycznej. Prace IPPT, nr 36, Warszawa, 1992.
57. Millard D. : Twinning in Single Crystals of Cadmium. Ph. D. Thesis. Univ. of Bristol, England, 1950.
58. Miller G.F., Pursey H. : The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of semiinfinite isotropic solid. Proc. of Royal Society, Vol. A223, 521, London, 1954.
59. Minsky M., Papert S : Perceptrons, MIT Press, Cambridge (USA), 1969.
60. Moczko A. : The evaluation of the Kaiser's effect in plain concrete. Zeszyty Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej, Vol. 40, Wrocław 1989, pp. 83 - 94.
61. Moliński W., Raczkowski J.,Poliszko S.,Ranachowski Z.: Mechanism of AE in wood soaked in water. Holzforschung, 45, (1), Goetingen, 1991, pp. 13-17.



62. Ohitsu M., Ono K. : Pattern Recognition Analysis of Magnetomechanical Acoustic Emission Signals. Journ. of Acoustic Emission, Vol. 3, 2, 1984, pp. 69 - 73.
63. Ohitsu M., Ono K. : The generalized theory and source representations of acoustic emission, Journ. of Acoustic Emission, Vol. 5, 4, 1986, pp.124 - 133
64. Ono K. : Amplitude Distribution Analysis of Acoustic Emission Signals. Materials Evaluation, Vol.34, 8, Columbus , Ohio, 1976, pp. 177 - 181.
65. Opilski A., Witos F., Ranachowski J., Ranachowski Z. : Applications of AE for the Investigations of Stresses in Geological Materials. Acoustic Letters, Vol. 8, 7, 1985, pp. 109 - 114.
66. Opilski A., Witos F. : Emisja akustyczna w węglu kamiennym. [w]: Malecki I., Ranachowski J. [red.]: Emisja Akustyczna.Zródła, Metody, Zastosowania. PASCAL Publications, Warszawa, 1994, pp. 353 - 376.
67. Pao Y., Gajewski R. : The Generalized Ray Theory and Transient Responses of Layered Elastic Solids. Physical Acoustics, Vol. XIII, 1977.
68. Pilecki Sz. : Acoustic Activity of Some Metals Determined by the Acoustic Emission Method. Archives of Acoustics, Vol. 14, 3 - 4, Warszawa 1989, pp. 261 - 281.
69. Pilecki S., Siedlaczek J. : Acoustic Activity of Some Metals Determined by the Acoustic Emission Method. Arch. of Acoustics, Vol.14, 3 - 4, Warszawa 1989, pp. 261 - 281.
70. Proctor, T. : An Improved Piezoelectric Acoustic Emission Transducer. Journ. Acoust. Soc. Am., Vol 71, 5, 1982, pp. 1163 - 1178.
71. Raabe J., Bobryk E., Ranachowski Z : Badania emisji akustycznej przy zginaniu trójpunktowym gęstych, drobnozarnistych tworzyw ceramicznych. Materiały elektroniczne, Vol. 72, 4, wyd. WEMA, Warszawa, 1990, pp. 22 - 32.
72. Raabe J., Bobryk E., Petrowsky W., Ranachowski Z : Badanie kinetyki rozprzestrzeniania się pęknięć w tworzywach ceramicznych na podstawie zmian oporności i EA. Materiały elektroniczne, Vol. 78, 2, wyd. WEMA, Warszawa, 1992, pp. 23 -33.
73. Raczkowski J., Moliński W., Ranachowski Z.: AE in Fracture Mechanics of Wood. Mechanika Teoretyczna i Stosowana. 2. 32. Warszawa. 1994 .pp. 299-322.

74. Ranachowski J., Rejmund F., Librant Z. : Emisja akustyczna w zastosowaniu do wyznaczania parametrów propagacji pęknięć i oceny wytrzymałości mechanicznej materiałów kruchych. [w:] Problemy i metody współczesnej akustyki, praca zbiorowa pod red. J Ranachowskiego, wyd. PWN, Warszawa, 1989, pp. 104 - 118.
75. Ranachowski J., Adamczyk E., Ranachowski Z., Dębowowski T.: Analizator emisji akustycznej EA4. Pomiary, Automatyka, Kontrola, nr 6, SimpPress, 1991, pp. 14 - 16.
76. Ranachowski J., Ranachowski Z., Rejmund F., Baumbach H. : An Investigation of the Mechanical Destruction Processes Using Electric and Acoustic Measurements. Ceramika, Vol. 43, wyd. ISiC Kraków 1993, ISSN 0860-3340, pp.48 -56.
77. Ranachowski J., Ranachowski Z., Zaboklicki A : Pomiary emisji akustycznej w trakcie laserowej obróbki ceramiki. Prace IPPT, 28/1994, Warszawa 1994.
78. Ranachowski Z. : Application of Acoustic Emission Method to Determine the Limit of Proportionality and the Static Strength in Concrete. [w: ] Brandt A., M., Marshall I., H.: Brittle Matrix Composites, Part 3., Elsevier Applied Science, London and New York, 1991, pp. 235 - 239.
79. Ranachowski Z. : Comparison of Descriptors Based on Statistical Signal Processing to Characterize Acoustic Emission Signals. Bull. of the Polish Sc. Acad. Technical Sciences. Vol.42, 2, Warszawa, 1994, pp. 241 - 246.
80. Ranachowski Z., The instrumentation for measurements of evoked otoacoustic emissions , Archives of Acoustics , 1994, Vol.19, 4, 525 - 532.
81. Ranachowski Z.: Pomiary emisji akustycznej w materiałach ceramicznych, drewnie i w metalach. Zeszyty naukowe AGH.Mechanika, tom 14, 2, Kraków, 1995, pp. 130 - 145.
82. Ranachowski Z : Application of a Neural Network to Classify the Acoustic Emission Waveforms Emitted by the Concrete under Thermal Stress. Archives of Acoustics, Vol. 21, 1, Warszawa, 1996, pp. 89 - 98.
83. Ranachowski Z. : Metoda sieci neuronowej w badaniu zależności emisji akustycznej od wytrzymałości betonu na ściskanie. [w:] Procesy niszczenia i wytrzymałość ceramiki, kości, betonu. Praca zbiorowa pod red. J Ranachowskiego i F. Rejmunda, wyd. IPPT, Warszawa, 1996, pp. 209 - 220.
84. Saunders J. C., Schneider M. E., Dear S. P. : The Structure and Function of Action in Hair Cells. J. Acoust. Soc Am., Vol. 78, 1, 1985, pp. 299 - 311.

85. Siddiqui K. J., Liu Y. H., Hay D. R., Suen C. Y. : Optimal Waveform Selection Using a Pseudosimilarity Method. *Journ. of Acoustic Emission*, Vol. 9, 1, 1990, pp.9 - 16.
86. Skubis J., Jezierski G., Ranachowski J. : Diagnostyka defektów materiałowych występujących w rurociągach wykonanych ze stali 13HMF. *Prace IPPT* nr 11/1992, Warszawa 1992.
87. Skubis J., Ranachowski Z., Boczar T., Lorenc M. : Analiza możliwości wykorzystania metody wzorcowania Hsu - Nielsena w układach do pomiaru EA od wyładowań niezupełnych. *Prace IPPT*, nr 20, Warszawa, 1994.
88. Smurzynski J., Kim D.O. : Distortion - product and click - evoked otoacoustic emissions of normally - hearing adults. *Hearing Res.*, Vol. 58, Elsevier Sc. Publ., 1992, pp.227 - 240.
89. Steen W., M. : *Laser material processing*. Springer Verlag, München, 1991.
90. Stephens R. : Waveforms and Frequency Spectra of Acoustic Emission. *Journ. of Acoustical Soc. Am.*, Vol. 50, 3, 1971, pp. 904 - 910.
91. Tadeusiewicz R. : *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa, 1993.
92. Wade A., Soulsbury P., Chow P., Brock I. : Strategies for characterization of chemical acoustic emission signals near the conventional detection limit. *Analytica Chimica Acta*, Vol. 246, Elsevier Sc. Publ., Amsterdam, 1991, pp. 23 - 42.
93. Weigl M. : *Sieci neuronowe i rozmyte systemy wnioskujące w problemach aproksymacji*. Praca doktorska, wyd. IPPT, Warszawa 1995.
94. White K. R. Vohr B. R., Maxon A. B., Behrens T. R. : Screening all newborns for hearing loss using transient evoked otoacoustic emissions. *Int. Journ. of Pediatric*
95. Williams R.V. : *Acoustic Emission*. Adam Hilger Ltd., Bristol, 1980, pp. 52 - 71.
96. Witos F., Malecki I. : Deskryptory emisji akustycznej. *Prace IPPT*, nr 39, Warszawa, 1993.
97. Witos F. : Fale sprężyste emisji akustycznej.[w:] Malecki I... Ranachowski J. [red.]: *Emisja Akustyczna. Źródła, metody, Zastosowania*. PASCAL Publications, Warszawa, 1994, pp. 35 - 54.



98. Wittaker J.W., Brosey W.D., Hamstad M.A. : Correlation of Felicity Ratio and Strength Behavior of Impact - Damaged Spherical Composite Test Specimens. Journ. of Acoustic Emission, Vol. 9, 2, 1990, pp. 85 - 92.
99. Yager R., Filev D. : Podstawy modelowania i sterowania rozmytego. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.
100. Yuki H., Homma K. : Analysis of Artificial Acoustic Emission Waveforms Using a Neural Network. Journ. of Acoustic Emission, Vol.10, 3/4, 1991, pp. 35 - 41.



56566