

---

**XXI Seminarium  
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW  
Zakopane 18-20 marca 2015**

---

**ZASTOSOWANIE EMISJI AKUSTYCZNEJ W DIAGNOSTYCE OBIEKTÓW  
TECHNICZNYCH**

Zbigniew RANACHOWSKI  
IPPT PAN, Warszawa  
*zranach@ippt.pan.pl*

### **1. Wprowadzenie**

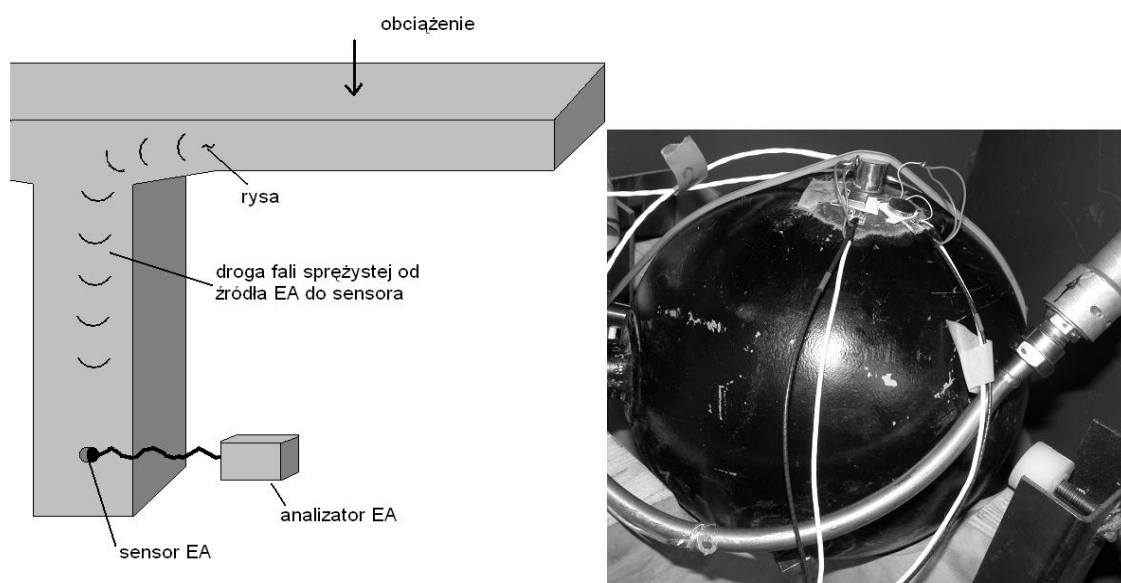
Metoda emisji akustycznej (EA) należy do szeroko stosowanych metod monitorowania obiektów inżynierskich takich jak: rurociągi, zbiorniki sprężonego gazu, silniki spalinowe, transformatory energetyczne. Należy do grupy metod pasywnych, to znaczy, że aparatura EA nie emituje sygnałów i nie wpływa na stan fizyczny badanego obiektu, natomiast rejestruje jedynie efekty fizyczne samoistnie powstające w monitorowanym obiekcie. Źródłami sygnału emisji akustycznej są: powstające i propagujące mikrorysy, procesy korozyjne, pękanie zbrojenia w betonowych konstrukcjach sprężonych, ulatnianie się gazu przez nieszczelność konstrukcji ciśnieniowej lub uszkodzenie izolacji wysokonapięciowych urządzeń energetycznych, to znaczy procesy, w których powstają i propagują się w obiekcie fale sprężyste. Aparatura EA rejestruje sygnał generowany w badanym obiekcie w trakcie jego normalnej eksploatacji lub podczas badań testowych. Zasada pomiaru sygnału EA wraz z przykładowym obiektem (zbiornikiem ciśnieniowym) została przedstawiona na rys. 1. Fale sprężyste generowane w źródle EA rozchodzą się od tego źródła we wszystkich kierunkach w objętości monitorowanego obiektu. Fale sprężyste docierają do sensora EA, a następnie są transmitowane do analizatora EA w postaci zmian napięcia elektrycznego. Model matematyczny propagacji tych fal i towarzyszących temu procesowi zmian ich postaci jest dosyć złożony i wykorzystuje własności funkcji Greena [1]. Aparatura pomiarowa składa się z sensora/sensorów EA przetwarzającego sygnał EA na zmienne napięcie elektryczne, analizatora EA wzmacniającego to napięcie i eliminującego sygnały nie pochodzące od monitorowanego źródła (tło akustyczne) oraz z urządzenia rejestrującego sygnał EA w postaci jego wybranych parametrów.

### **2. Opis zjawiska i metod pomiarowych**

#### **2.1 Sensory EA**

Źródła EA w ciałach stałych w generują sygnał EA w postaci drgań harmonicznym w szerokim przedziale częstotliwości, najczęściej 1 - 1000 kHz. Własności użytkowe sensorów EA charakteryzuje się za pomocą dwóch parametrów: pasma użytkowego, czyli przedziału rejestrowanych częstotliwości oraz czułości, czyli wartości napięcia generowanego w czasie pobudzenia falą sprężystą. Stosowane są dwa typy sensorów: rezonansowe i szerokopasmowe. Sensory rezonansowe rejestrują sygnał EA w jednym z przedziałów częstotliwości: dolnym (1 - 100 kHz), pośrednim (100 - 450 kHz) i wysokim (200 - 1000 kHz). Sensory szerokopasmowe mają możliwość rejestracji sygnałów w kilku z podanych wyżej pasm częstotliwości, a ich budowa jest bardziej złożona w porównaniu z sensorami rezonansowymi, co rzutuje na koszt wykonania. Zastosowanie sensorów szerokopasmowych jest celowe w badaniach kompozytów i elementów ceramicznych,

natomiast w przypadku diagnostyki elementów betonowych i stalowych stosuje się sensory rezonansowe pracujące w jednym z dwóch niższych przedziałów częstotliwości podanych wyżej.



Rys.1. Schemat generacji i rejestracji sygnału EA (z lewej), obiekt rzeczywisty – zbiornik sprężonego powietrza w trakcie badania metodą EA (z prawej)

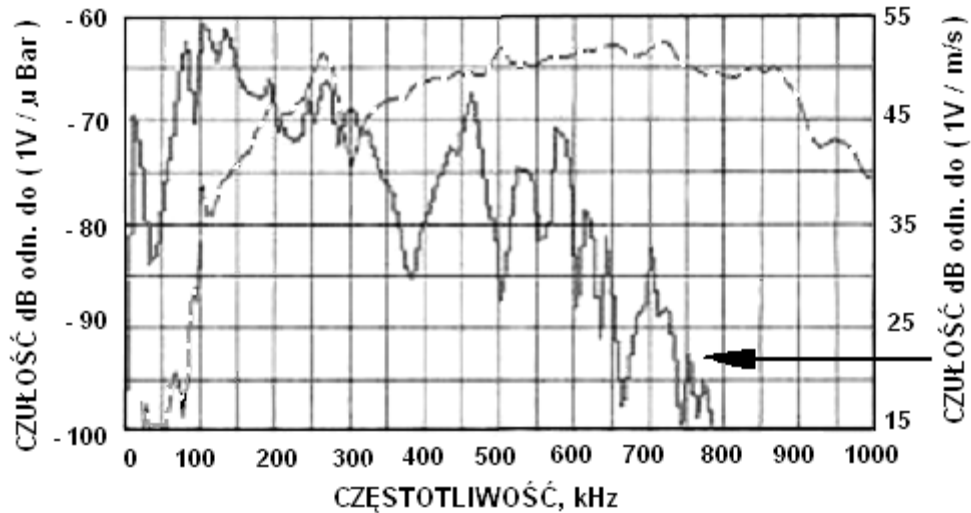
Czułość sensorów rejestrujących sygnał EA jest określana przy pomocy procedur wykorzystujących pobudzenie wzorcową falą sprężystą. Drgania harmoniczne powierzchni badanego obiektu mogą być charakteryzowane za pomocą dwóch jednoznacznie zależnych od siebie parametrów: maksymalnej prędkości [m/s] lub maksymalnego przyspieszenia [m/s<sup>2</sup>]. Te dwie wielkości są wymiennie stosowane przy określaniu czułości sensorów EA. Uwzględniając masę sensora i pole jego powierzchni czołowej sprzężonej z badanym obiektem możliwe jest określenie czułości sensora poprzez podanie napięcia na jego wyjściu przy pobudzeniu go określoną amplitudą fali ciśnienia (zamiast podawania wartości przyspieszenia występującego na wejściu sensora). Ciśnienie to jest odnoszone do napięcia wytwarzanego na wyjściu sensora i podawane w skali logarytmicznej odnoszącej się do poziomu 1 mikrobara (w decybelach) według wzoru na czułość sensora  $S$  :

$$S = 20 \log (u_n / p) \quad (1)$$

gdzie:  $u_n$  jest wartością skuteczną napięcia [V], rejestrowaną na sensorze pobudzonym falą sprężystą wywołującą na powierzchni sensora ciśnienie o wartości skutecznej  $p$ , wyrażone w mikrobarach. Czułość sensora EA jest różna przy różnych częstotliwościach odbieranego przezeń sygnału i dlatego producenci sensorów dostarczają wraz z produktem jego charakterystykę w postaci zależności parametru  $S$  od częstotliwości w paśmie roboczym. Sensory dobrej klasy charakteryzują się czułością nie niższą niż - 60 dB odniesioną do 1 V napięcia wyjściowego i 1 mikrobara ciśnienia wejściowego. Lewa skala i krzywa oznaczona linią przerywaną na rys 2. pokazują zależność czułości  $S$  od częstotliwości odbieranego sygnału EA sensora szerokopasmowego wysokiej jakości [2]. Jeżeli ten sam sensor jest pobudzany drganiami harmonicznymi o znanej prędkości, to zależność jego czułości od częstotliwości ma odmienny przebieg niż w przypadku

pobudzenia zmianami ciśnienia. Jest to skutkiem zmniejszania się prędkości maksymalnej  $V$  wraz ze wzrostem częstotliwości gdy fala sprężysta ma stałe przyspieszenie  $A$ :

$$V = A / 2 \pi f \quad (2)$$



Rys.2. Typowa zależność czułości sensora EA, wyrażoną w dB / 1 mikrobar (linia ciągła) oraz w voltach na jednostkę prędkości fali sprężystej w funkcji częstotliwości sygnału EA (linia przerywana)

Prawa skala i krzywa oznaczona linią ciągłą na rys 2. pokazują zależność czułości sensora szerokopasmowego od częstotliwości określoną w decybelach odniesionych do pobudzenia sensora falą sprężystą o prędkości 1 [m/s].

Sygnal EA na wyjściu sensora charakteryzuje się niskim napięciem (0.1 - 100 mV), co sprawia, że może on zostać zakłócony wskutek oddziaływania lokalnych pól elektromagnetycznych. Dlatego sensor powinien znajdować się w odległości co najwyżej kilku metrów od przenośnego analizatora sygnału, albo sensor musi mieć wbudowany standardowy moduł wzmacniający, umożliwiający dalszą transmisję drogą kablową na odległość do ok. 150 metrów. Jest to istotne zwłaszcza przy monitorowaniu rozległych obiektów takich jak: mosty, zbiorniki paliw czy rurociągi.

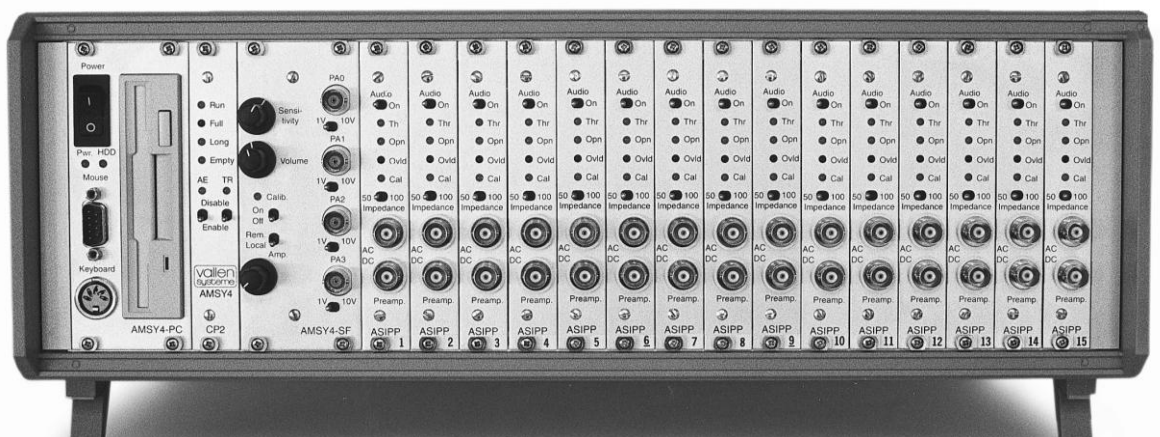
## 2.2 Obróbka sygnału EA

W analizatorze EA sygnał z sensora jest wzmacniany i poddawany filtracji w celu usunięcia tła akustycznego pochodzącego z otoczenia monitorowanego obiektu. W przypadku badań polowych tło akustyczne jest generowane przez pracujące urządzenia i poruszające się pojazdy; w laboratorium źródłem są m.in. urządzenia używane do mechanicznego obciążania badanych elementów. Kolejnym etapem przetwarzania sygnału jest jego przekształcenie na postać cyfrową, a dalsza jego obróbka jest prowadzona za pomocą wyspecjalizowanych procesorów lub komputerów, przy czym rejestracji dokonuje się w jednostkach szybkiej pamięci masowej. Sygnał z sensora EA jest analizowany w torze pomiarowym przedstawionym w postaci schematu blokowego na rys 3.

Jednokanałowy analizator EA zaprojektowany do zastosowań terenowych, wyposażony w zasilanie akumulatorowe, mikroprocesor i pamięć nieulotną do rejestracji wyników pomiaru typu FLASH przedstawiono w górnej części rys. 4. Wielokanałowy laboratoryjny analizator EA z wbudowanym komputerem przemysłowym, pracującym pod systemem Windows przedstawiono w dolnej części tego rysunku.



Rys. 3. Schemat blokowy jednego kanału obróbki sygnału EA.



Rys. 4. Jednokanałowy analizator EA zaprojektowany do zastosowań terenowych, wyposażony w zasilanie akumulatorowe (na górze). Wielokanałowy laboratoryjny analizator EA z wbudowanym komputerem przemysłowym, pracującym pod systemem Windows (na dole).

Zastosowanie analizatorów wielokanałowych pozwala na lokalizację źródeł EA w obiektach, a także na wyznaczanie rozmiaru aktywnego obszaru emitującego sygnał EA. W wyniku obróbki sygnału EA uzyskiwana jest informacja o jego zmianach w funkcji czasu, a także wyznaczana jest charakterystyka natężenia w funkcji częstotliwości. Ponieważ w ciągu każdej sekundy rejestracji jest gromadzone od 100 kilobajtów do kilku megabajtów danych, procesory sygnału EA muszą się charakteryzować wysoką wydajnością. Zmiany sygnału EA są określane w ten sposób, że wykrywany jest moment przekroczenia przez wartość chwilową sygnału określonego poziomu. W sygnale EA można odróżnić następujące parametry, nazywane deskryptorami EA:

- czas trwania zdarzenia EA; jest to przedział pomiędzy pierwszym i ostatnim przekroczeniem progu wykrywalności przez sygnał;
- liczba zliczeń emisji akustycznej; jest to liczba wykrytych przekroczeń określonej wartości napięcia;
- maksymalna amplituda w czasie trwania zdarzenia EA.

Rozszerzony wykaz stosowanych deskryptorów EA zamieszczono w Tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Najczęściej stosowane deskryptory EA [2]

Nazwa deskryptora	Dodatkowe wyjaśnienia
<b>POCHODNE ZMIAN W CZASIE</b>	
Suma przekroczeń	Uzyskuje się przez zliczanie obszarów, w których amplituda przekracza próg wykrywalności
Suma zdarzeń całego pomiaru	Suma wszystkich zdarzeń emisji akustycznej zarejestrowanych w serii pomiarowej
Średnia liczba zdarzeń w serii pomiarowej	Suma zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez liczbę pomiarów $n_{ii}$
	$N_{sr} = \frac{\sum N_{zd}}{n_{ii}}$
Liczba przejść przez wybrany poziom amplitud	Liczba przekroczeń 10%, 20%, 50% amplitudy maksymalnej
<b>POCHODNE PRZEBIEGÓW CZASOWYCH</b>	
Amplituda szczytowa $U_m$	Maksymalna amplituda w czasie trwania sygnału impulsowego
Średnia wartość amplitudy w serii pomiarowej	Suma amplitud szczytowych wszystkich zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez liczbę zdarzeń
	$U_{sr} = \frac{\sum U_m}{N_{zd}}$
Powierzchnia nad wartością średnią	Suma iloczynów kolejnych próbek wartości sygnału i przedziałów próbkowania.
Okres półtrwania	Czas trwania sygnału do osiągnięcia połowy amplitudy.

<b>POCHODNE ENERGII</b>	
Wartość skuteczna za przedział czasu $T$	$U_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2 t dt}$
Współczynnik kształtu	Stosunek $U_m$ do $U_{\text{rms}}$
Energia zdarzenia EA	<p>Połowa iloczynu amplitudy szczytowej i czasu trwania zdarzenia podzielona przez wartość impedancji sensora</p> $E_{zd} = \frac{1}{2} U_m^2 \Delta t / Z$
Średnia energia zdarzeń EA w serii pomiarowej	<p>Suma energii <math>E_{zd}</math> wszystkich zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez liczbę <math>N_{zd}</math> zdarzeń</p> $E_{\acute{s}r} = \frac{\sum E_{zd}}{N_{zd}}$
<b>POCHODNE ROZKŁADU CZĘSTOTLIWOŚCIOWEGO</b>	
Mediana rozkładu widmowego	Granica podziału rozkładu na części o równej mocy
Współczynnik kształtu prążków widmowych	Stosunek prążka maksymalnego do średniej wartości prążka
Liczba przekroczeń wybranego poziomu przez prążki widma	Liczba przekroczeń 10%, 20%, 50% wartości prążka maksymalnego

### 2.3 Lokalizacja źródeł EA

Lokalizacja źródeł sygnału EA przy zastosowaniu aparatury wielokanałowej jest wykonywana w sposób następujący. Przy założeniu stałej prędkości  $v$  propagacji fali sprężystej w badanym materiale wykonywany jest pomiar różnicy odległości  $\Delta l$  źródła EA od pary sensorów. Pomiar  $\Delta l$  jest dokonywany drogą pośrednią przez wyznaczenie różnicy  $\Delta t$  czasu odebrania sygnału EA przez parę sensorów:

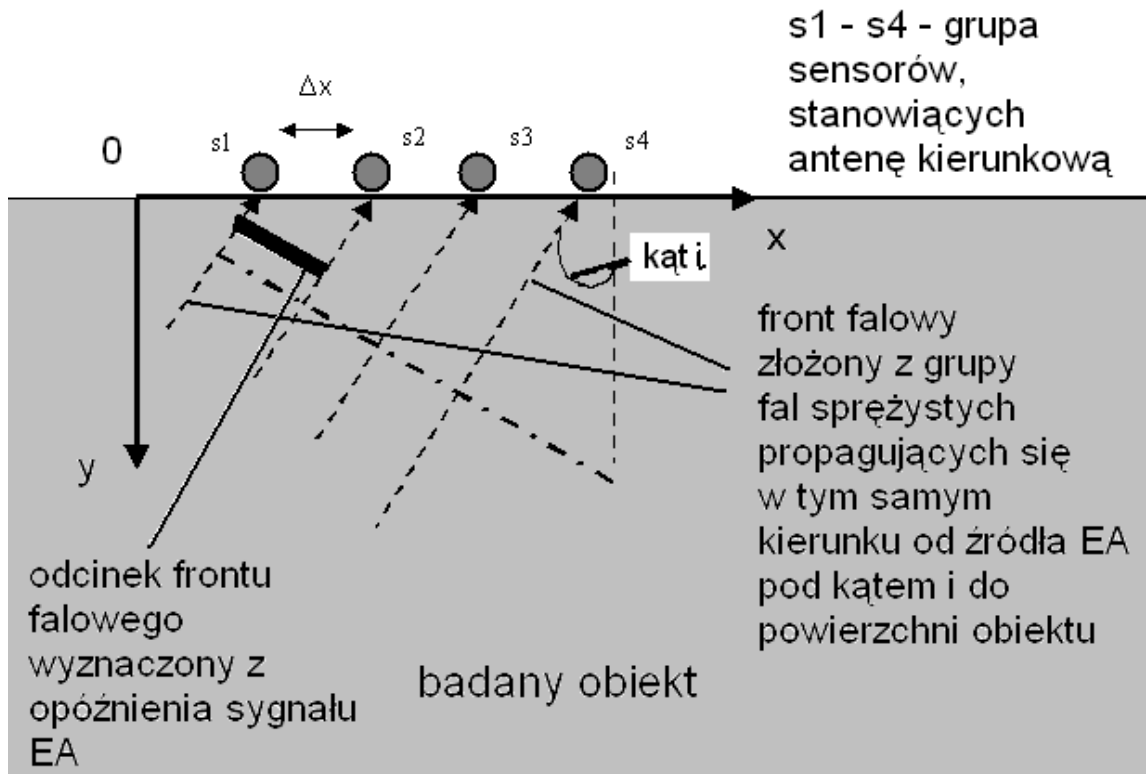
$$\Delta l = v \Delta t \quad (3)$$

Miejszem geometrycznym punktów na płaszczyźnie, w których bezwzględna różnica odległości  $|\Delta l|$  od ustalonych lokalizacji pary sensorów (t.j. ognisk krzywej) jest hiperbola. Zatem możliwym miejscem usytuowania źródła EA są punkty należące do tej hiperboli. Uzupełnienie uzyskanej w ten sposób informacji o współrzędne drugiej hiperboli, która przecina opisaną wyżej krzywą, co umożliwi wyznaczenie współrzędnych źródła EA, uzyskuje się w wyniku analizy sygnałów odebranych przez sensory położone w dwóch innych punktach monitorowanego obszaru.

Rozwiązaniem alternatywnym są bardziej złożone systemy sensorów EA, nazywane antenami. Systemy te rozmieszczone są na powierzchni obiektu w sposób pokazany na rys. 7. Analiza różnic czasu nadejścia sygnału EA docierającego do elementów składowych takiego systemu stwarza możliwość określenia kierunku, z którego ten sygnał jest propagowany. Do sensorów  $s_1, s_2, \dots, s_4$  sygnał EA dociera kolejno z opóźnieniem  $\Delta t$  w miarę jak front falowy (grupa fal sprężystych), pochodzący od źródła EA zbliża się do sensorów. Odległość pomiędzy sensorami w antenie pokazanej na rys. 5. wynosi  $\Delta x$ . Przy założeniu, że sygnał EA dochodzi do kolejnych sensorów z opóźnieniem  $\Delta t$  można

analogicznie jak we wzorze (3) wyznaczyć odcinek opóźnienia frontu falowego  $\Delta l = v \Delta t$ . Proste zależności geometryczne pozwalają wyznaczyć kąt  $i$  pomiędzy wiązką padającą od źródła EA a płaszczyzną anteny kierunkowej analogicznie jak w równaniu [1] z zależności:

$$\sin i = v \Delta t / \Delta x \quad (4)$$

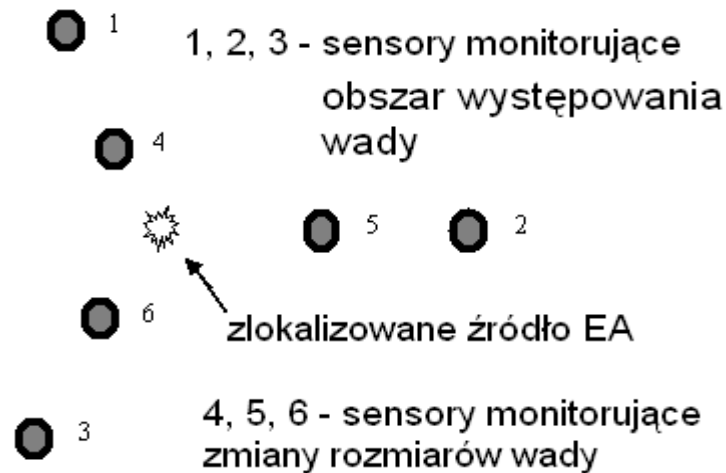


Rys. 5. Antena kierunkowa, zbudowana z grupy sensorów s1...s4 i umożliwiająca wyznaczenie kierunku z którego propaguje się fala sprężysta EA.

Większa liczba anten umieszczonych pod różnymi kątami umożliwia efektywną lokalizację źródeł EA.

Inną metodą monitorowania źródła EA jest ograniczenie się do „nasłuchu” sygnału z konkretnego miejsca (np. pęknięcia wykrytego metodą defektoskopii ultradźwiękowej) z eliminacją sygnałów nadchodzących z otoczenia. W przypadku prowadzenia pomiarów na eksploatowanym obiekcie na ogół odbieranych jest wiele sygnałów wywołanych przez poruszające się pojazdy, elementy konstrukcji odkształcające się w wyniku relaksacji naprężeń termicznych i tym podobne. Opisywana metoda jest określana terminem rejestracji selektywnej (*guard sensing*). Metoda ta jest efektywna przy długotrwałym badaniu eksploatowanych konstrukcji w celu monitorowania wykrytego pęknięcia, jeżeli jego usytuowanie nie wymaga natychmiastowego podjęcia procedury naprawczej. Przykład rozmieszczenia sensorów w metodzie *guard sensing* pokazano na Rys. 6. Wszystkie sensory są połączone z analizatorem EA, umożliwiającym określenie czasu zarejestrowania przez nie sygnału. Jeżeli sygnał jest rejestrowany wcześniej przez grupę sensorów położonych bliżej od monitorowanego uszkodzenia (t.j. sensory nr 4, 5 i 6) od sensorów ustalających obszar w którym znajduje się to uszkodzenie (sensory 1,2,3) to sygnał ten jest klasyfikowany jako pochodzący od monitorowanego uszkodzenia.

Jednocześnie sensory wewnętrzne umożliwiają precyzyjną lokalizację miejsca, z którego sygnał jest generowany, co umożliwia śledzenie zmian jego wymiarów.



Rys. 6. Rozmieszczenie sensorów EA (oznaczonych jako 1,2,3,4,5 i 6) w metodzie *guard sensing*.

W dostępnych źródłach znaleźć można opisy procedur kalibracji torów pomiarowych opracowane przez lokalne urzędy normalizacyjne. Dotyczą one metod powtarzalnego wytwarzania sygnału typu impulsowego zbliżonego swoją naturą do sygnałów generowanych w badanych elementach, który mógłby być rejestrowany przez te tory przed rozpoczęciem właściwego pomiaru [4]. W trakcie procesu kalibracji reguluje się aparaturę w taki sposób, aby zapewnić jednakowy we wszystkich pomiarach poziom czułości różnych części składowych stosowanego sprzętu. Najbardziej rozpowszechniony jest test A. Nielsena [4]. Sygnał wzorcowy jest generowany przy pomocy teflonowej nakładki na ołówek automatyczny, przez którą wysuwa się 3 mm grafitu o grubości 0,5 mm i twardości 2H. Nakładka eliminuje tarcie ołówka o brzeg obiektu w trakcie prowadzenia testu. Po wysunięciu grafitu łamie się go na badanym elemencie przez naciśnięcie na ukośnie ustawioną nakładkę. Odpowiada to wytworzeniu na powierzchni badanego obiektu skokowego impulsu siły o amplitudzie ok. 1,6 N. Średnie odchylenie standardowe amplitudy sygnału EA mierzone w ten sposób w serii 10 prób wynosi ok. 5%. Dopuszcza się nieuniknione różnice wyznaczanych amplitud sygnału w porównywanych torach do wartości nie przekraczającej 4 dB. Energia emitowana w trakcie opisanego testu jest porównywalna z sygnałem generowanym przez duże źródło EA (typu rysy propagującej się o  $\Delta l = 0,1$  mm w stali konstrukcyjnej).

### 3. Badanie efektów EA w obiektach żelbetowych

W elementach betonowych występują efektywne źródła generacji sygnałów EA pod wpływem obciążeń, oddziaływań klimatycznych i in. Te elementy zawierają rozproszone losowo liczne mikrodefekty powstające podczas wiązania i rozwijające się w trakcie twardnienia mieszanki betonowej: pory i mikropory, rysy i mikrorysy. W stwardniałym betonie powstają strefy lokalnych naprężeń, związane z niejednorodnością betonu, to znaczy z obecnością kruszywa, uzbrojenia lub włókien zbrojenia w matrycy cementowej. Powoduje to silne zakłócenia w propagacji sygnałów EA w objętości badanego elementu. Rejestrację sygnałów EA w betonie ściskany zapoczątkował w 1959 r. Rüş [3].



Obecnie liczne ośrodki w wielu krajach prowadzą zaawansowane badania betonowych elementów konstrukcyjnych metodą emisji akustycznej. Badane są rozmaite konstrukcje, będące z różnych powodów przedmiotem prac diagnostycznych. W wielu krajach, m. in. w Stanach Zjednoczonych i Japonii opracowano zalecenia dotyczące parametrów aparatury pomiarowej EA w celu umożliwienia porównywania otrzymanych wyników. Najważniejsze informacje zawarte w zaleceniach przyjętych w tych dwóch krajach zestawiono w Tabeli 3.1 jednakże zalecenia te nie są jednakowe. Przyjęto m.in., że sygnał EA może być rejestrowany z odległości nie przekraczającej 2 m jeżeli częstotliwość zakresu maksymalnej czułości sensora EA jest bliska 60 kHz. Jeżeli częstotliwość maksymalnej czułości jest wyższa (150 kHz) to obszar monitorowania sygnałów EA zawęża się do ok. 1 m. Silne sygnały EA, np. pochodzące od pęknięć prętów zbrojenia, mogą być rejestrowane z odległości kilkunastu metrów przy zastosowaniu sensorów pracujących w paśmie niskich częstotliwości (1 - 20 kHz). Ważnym parametrem zamieszczonym w Tabeli 3.1., jest próg wykrywalności. Sygnały EA o amplitudach niższych od wartości podanych w Tabeli są interpretowane jako tło akustyczne i nie są rejestrowane. Częstotliwość próbkowania sygnału ma wpływ na pasmo częstotliwościowe sygnału EA, które musi podlegać dalszej obróbce.

Ustalenie wyższej częstotliwości próbkowania wymaga zastosowania aparatury o wyższej mocy obliczeniowej użytej do analizy sygnału i przez to droższej. Zalecenia podane w Tabeli 3.1 obejmują specyfikację bloku filtrów, które eliminują z sygnału EA składowe o częstotliwościach poniżej i powyżej pewnych częstotliwości granicznych. Zalecenia amerykańskie preferują przetwarzanie szerszego pasma sygnału w porównaniu do zaleceń japońskich i generalnie te pierwsze zalecenia wymagają zastosowania aparatury bardziej uniwersalnej, co może rzutować na jej wyższą efektywność w sensie możliwości wykrycia i monitorowania wad.

Tabela 3.1. Parametry aparatury pomiarowej do rejestracji sygnału EA

Nazwa parametru	zalecenia japońskie [6]	zalecenia amerykańskie [5]
Częstotliwość maksymalnej czułości sensora EA	60 kHz lub 150 kHz (wyższe częstotliwości są bardziej tłumione w betonie, co ogranicza zasięg ich rozprzestrzeniania się)	150 kHz
Wzmocnienie przedwzmacniacza	40 dB	40dB
Próg wykrywalności odn. do 1 mikrowolta	45 dB	45 - 55 dB
Częstotliwość próbkowania sygnału EA	1 MHz	2 MHz
Częstotliwości graniczne bloku filtrów sygnału	20 - 150 kHz	20 - 200 kHz
Czas niezbędny do zapisania segmentu sygnału (czas nieaktywności aparatury)	1000 $\mu$ s	400 $\mu$ s
Czas martwy toru pomiarowego występujący po odebraniu zdarzenia EA i potrzebny na jego obróbkę	50 - 200 $\mu$ s	50 - 200 $\mu$ s

W Polsce diagnostyka betonowych obiektów mostowych przeprowadzana jest zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury [15] oraz Zarządzeniem GDDK [16]. Generalnie wymienione dokumenty zalecają stosowanie podczas przeglądów bieżących oraz kontroli okresowych tylko obserwację wizualną, natomiast podczas przeglądów szczegółowych zalecane są badania zaawansowane, w tym wykorzystujące metody nieniszczące. Polski Urząd Normalizacyjny wydał cztery normy dotyczących metody EA [17]:

Przykłady stosowania metody EA podczas takich badań oraz podział monitorowanych elementów z betonu sprężonego na klasy w oparciu o rodzaj zarejestrowanych w obiektach sygnałów EA podano w m.in. w [7]. Rodzaj uszkodzeń występujących w poszczególnych klasach przedstawiono w Tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Rodzaje uszkodzeń w elementach z betonu sprężonego identyfikowane za pomocą analizy rejestrowanego sygnału EA.

Oznaczenie klasy	Rodzaj uszkodzenia
1	mikropęknięcia w betonie na granicy frakcji kruszywa o małych wymiarach ( $\Phi \leq 2$ mm) i zaprawy cementowej
2	mikropęknięcia w betonie na granicy frakcji kruszywa o małych i średnich wymiarach ( $\Phi \leq 8$ mm)
3	powstanie i rozwój rysy w strefie rozciąganej betonu
4	rozwój rysy oraz tarcie na granicy frakcji kruszywa o dużych wymiarach ( $\Phi = 8 - 16$ mm)
5	pęknięcia na granicy beton - zbrojenie
6	uplastycznienie stali i betonu
7	odspojenie się zbrojenia sprężającego od betonu
8	zerwanie splotów sprężających

Występowanie sygnałów zakwalifikowanych do klas od 3 do 8 jest interpretowane jako wykrycie procesów niebezpiecznych dla eksploatacji konstrukcji.

Badania sygnału EA generowanego w obciążanych mechanicznie elementach betonowych umożliwiły identyfikację dwóch zjawisk towarzyszących temu procesowi. Pierwsze z tych zjawisk to *trójstadialna natura rozwoju mikrorys* w procesie ściskania elementu betonowego [8]. Zaobserwowano, że w zakresie od 0 do ok. 0,2 - 0,4 wielkości naprężenia niszczącego w objętości betonu zachodzą procesy stabilnego powstawania mikrorys aktywnych akustycznie. Po przekroczeniu wymienionego powyżej poziomu, określanego jako naprężenie inicjujące, rozpoczyna się etap stabilnego powiększania rozmiarów i łączenia się powstałych defektów. Towarzyszy temu wyższy od poziomu tła poziom rejestrowanego sygnału EA. Etap ten przebiega aż do osiągnięcia ok. 0,6 - 0,7 naprężenia niszczącego. Po przekroczeniu tego drugiego poziomu, określanego jako naprężenie krytyczne rozpoczyna się bardziej intensywny proces wzrostu rys i wzrost energii rejestrowanego sygnału EA. W trakcie tego stadium destrukcji betonu rejestruje się spadek prędkości fal ultradźwiękowych propagowanych w objętości materiału. Sygnał EA w tym zakresie obciążania betonu charakteryzuje się najwyższą intensywnością.

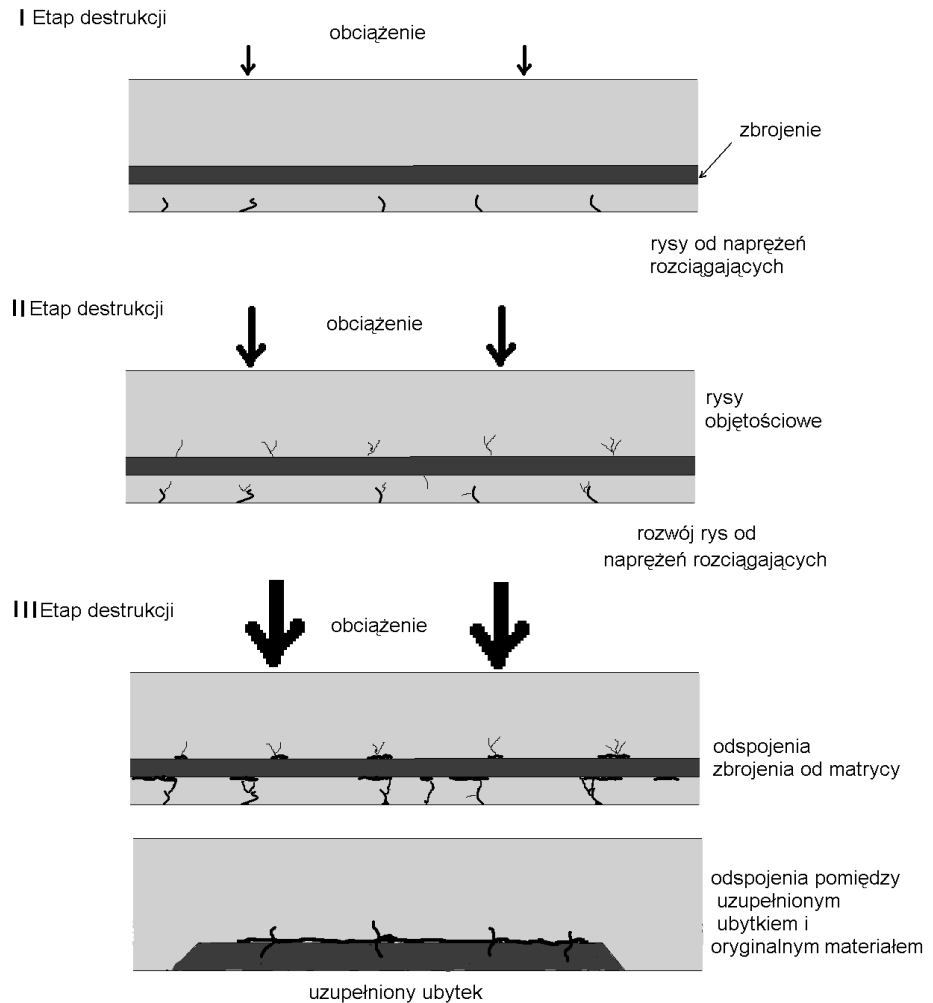
Metoda EA została również zastosowana do identyfikacji składników próbek betonowych poddawanych badaniu metodą pomiaru mikrotwardości. Badania prowadzono w IPPT PAN w ramach projektu „Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego”, POIG.01.01.02-24-005/09 finansowanego przez Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka 2007-2013 [6]. W próbkach betonu wykonywane były odciski przy pomocy węgelnika Vickersa. W ramach tych badań stwierdzono, że

wartość energii sygnału EA generowanego w trakcie wykonywania odcisków w matrycy cementowej, w kruszywie granitowym oraz w tak zwanych „obszarach o niskiej zwartości” jest zróżnicowana. W przypadku odcisków w ziarnach kruszywa otrzymano średnie wyniki energii sygnału EA 14225 jednostek umownych (j.u.), w trakcie wykonywania odcisków w matrycy cementowej rejestrowano średnio wartość 9724 j.u., natomiast w „obszarach o niskiej zwartości” otrzymywano średnio 11682 j.u.

W betonie obserwuje się także tzw. efekt Kaisera w trakcie wielokrotnego obciążania elementu. Podczas pierwszego cyklu obciążania w materiale następuje rozwój rys, wywołujących generację sygnału EA. Jeżeli ten proces zostanie przerwany przez zatrzymanie wzrostu obciążenia a następnie będzie prowadzony od niewielkiej wartości obciążenia to dalszy rozwój rys i towarzysząca mu generacja sygnału EA rozpocznie się dopiero po przekroczeniu poprzedniego poziomu obciążenia elementu. Stwarza to możliwość poznania historii obciążania badanego obiektu. Jako przykład można podać badanie przeprowadzone na Politechnice Wrocławskiej [9], podczas którego rejestrowano generację sygnału EA w trakcie obciążania zbrojonej belki żelbetowej o długości 3,8 m i przekroju 0,3 X 0,3 m, zginanej metodą trójpunktową za pomocą hydraulicznej maszyny wytrzymałościowej. W trakcie pierwszego cyklu obciążono belkę siłą  $F_0$ , nie powodującą powstania naprężeń krytycznych. Następnie belkę odciążono i po chwili ponownie obciążono siłą narastającą do  $F_1 > F_0$ . W trakcie czasie ponownego obciążania aktywność akustyczna była rejestrowana zgodnie z efektem Kaisera dopiero po przekroczeniu  $F_0$ . Efekt ten stopniowo zanika po dłuższym przetrzymywaniu badanego obiektu pod niskim obciążeniem wskutek procesów zarastania mikrorys w dojrzewającym betonie.

Źródłem sygnału EA jest także interakcja beton – zbrojenie w obciążonych elementach konstrukcyjnych. Rozwój defektów w tych obiektach został schematycznie pokazany na Rys. 7. W zakresie niewielkich obciążeń żelbetowego elementu konstrukcyjnego rozwijają się i propagują mikrorysy w strefach, w których istnieją naprężenia rozciągające.

Efektom tym towarzyszy generacja sygnału EA o niewielkich amplitudach 0,1 – 1 mV. Wzrost obciążenia elementu wywołuje dalszy wzrost mikrorys w tych strefach. Większe rozmiary mikrorys skutkują wzrostem amplitud emitowanego sygnału EA (10 – 100 mV). Na rys. 8 przedstawiono to jako etap II destrukcji elementu. Kolejnym stadium tego procesu jest etap III, w którym pojawiają się odspojenia zbrojenia od matrycy, ewentualnie odspojenia pomiędzy uzupełnionym ubytkiem i materiałem oryginalnym. W strefach odspojień oprócz naprężeń rozciągających istnieją także naprężenia ścinające na granicy materiałów różniących się własnościami mechanicznymi, co dotyczy zwłaszcza zbrojenia charakteryzującego się znaczną odkształcalnością w zakresie plastycznym. Na podstawie eksperymentów, w których belki zbrojone były obciążane cyklicznie wykazano m. in. w pracy [10], że na etapie III mikrorysy w strefie rozwoju spękań osiągają długość 0,15 – 0,2 mm. Na tym etapie nie obserwuje się zgodności emisji sygnału EA z efektem Kaisera, ponieważ znaczna część rejestrowanego sygnału EA o wysokich amplitudach pochodzi od zamykających się pustek w mikrorysach w trakcie zmniejszania się obciążenia badanych belek, a także od wzajemnego tarcia ścianek mikrorys przy niewielkich obciążeniach. Istotna część źródeł EA jest usytuowana w strefie kontaktowej beton – zbrojenie. Amplituda sygnału EA pochodząca od tych źródeł charakteryzuje się amplitudami sygnału poniżej 10 mV, jednak liczba zdarzeń EA rejestrowanych w strefach spękań jest bardzo duża. Autorzy publikacji [10] wskazują na możliwość rozpoznania stopnia destrukcji elementu konstrukcyjnego przez badanie, czy sygnały EA są generowane jedynie w trakcie wzrostu jego obciążenia, czy również w trakcie odciążania.



Rys.7. Schemat rozwoju defektów w betonie zbrojonym

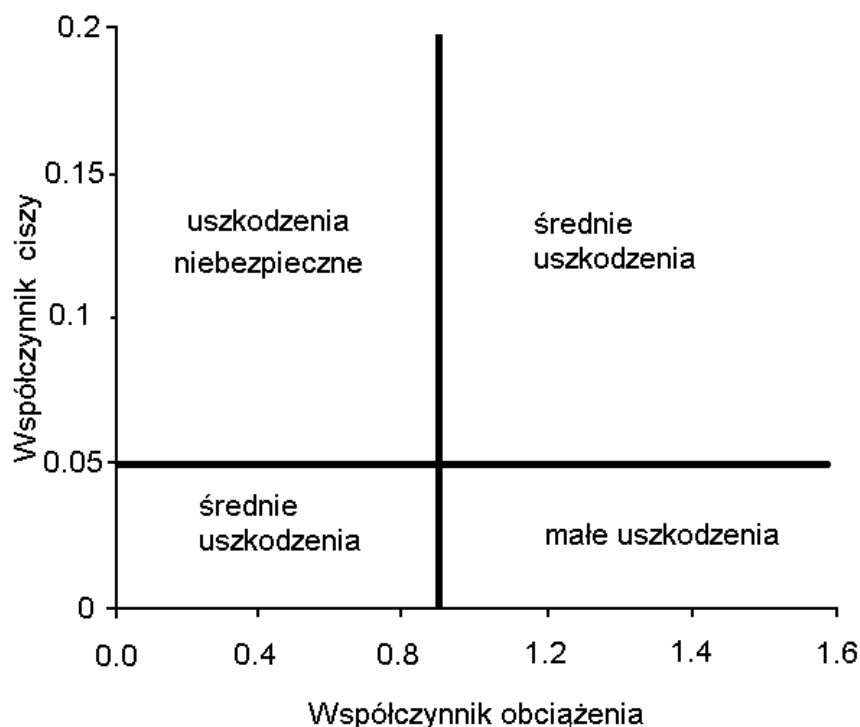
Japońska organizacja NDIS opracowała w 2000 roku zalecenie badania elementów żelbetowych [6]. Zaleca ono zastosowanie następującej metody obciążania badanego elementu: Obciążenie jest stopniowo powiększane od minimalnego do maksymalnego  $P_{max}$ , następnie zdejmowane i ponownie podnoszone do  $P_{bis}$ . Ta ostatnia wartość jest rejestrowana wtedy, kiedy w trakcie powtórznego podnoszenia obciążenia wystąpi znaczący poziom sygnału EA. W wyniku wyznacza się na podstawie określenia zmian liczby zdarzeń EA rejestrowanych w kolejnych przedziałach czasu dwa parametry: współczynnik obciążenia (*load ratio LR*) oraz współczynnik ciszy (*calm ratio CR*). Współczynnik obciążenia jest ilorazem wartości obciążenia  $P_{bis}$  z drugiego cyklu i  $P_{max}$  z pierwszego cyklu, czyli

$$LR = P_{bis} / P_{max} \quad (7)$$

Współczynnik ciszy definiuje się jako iloraz liczby zdarzeń  $N_c$  zarejestrowanych od chwili osiągnięcia  $P_{max}$  do chwili zdjęcia obciążenia i liczby zdarzeń  $N_{calc}$  zarejestrowanych w trakcie całego cyklu obciążania/odciążania, czyli

$$CR = N_c / N_{calc} \quad (8)$$

Współczynniki  $LR$  i  $CR$  można wyznaczać w odniesieniu do elementów żelbetowych konstrukcji mostowych, zwłaszcza głównych belek nośnych (*girders*). Możliwe jest wykorzystanie przemieszczania się cięższych pojazdów po konstrukcji lub siłowników hydraulicznych jako sposobu obciążania. W pracy [1] podano zalecenia opisujące w skali trzystopniowej stopień uszkodzenia monitorowanej konstrukcji przy zastosowaniu czterech pól wyznaczanych na obszarze ograniczonym osiami wyskalowanymi w jednostkach  $LR$  i  $CR$ . Cztery pola na tak wykonanym wykresie oznaczają obszary występowania określonych wartości współczynników  $CR$  i  $LR$  w sposób pokazany na rys 8. Pomiar laboratoryjny na belkach obciążanych hydraulicznie wykazały, że gdy rejestrowano sygnał EA charakteryzujący się współczynnikiem  $CR > 0,5$  oraz współczynnikiem  $LR < 0,9$  źródłem sygnału akustycznego były rysy o rozwarciu powyżej 0,5 mm, co świadczyło o wystąpieniu poważnych uszkodzeń. Uszkodzenia średnie, odpowiadające rozwarciu rys większemu od 0,3 mm i mniejszemu od 0,5 mm były rejestrowane gdy występowały następujące zależności :  $CR < 0,05$  i  $LR < 0,9$  albo  $CR > 0,05$  i  $LR > 0,9$ . Najmniejsze rozwarcia rys były mierzone na pozostałym obszarze zależności  $CR - LR$ .



Rys.8. Klasyfikacja sygnałów EA rejestrowanych w obciążanych elementach żelbetowych za pomocą współczynników ciszy i obciążenia.

#### 4. Badanie obiektów stalowych

W stalowych elementach konstrukcyjnych typowymi źródłami EA są pęknięcia, ubytki korozyjne i miejsca, gdzie możliwe jest tarcie o siebie złączonych powierzchni. Badania nieniszczące ukierunkowane są na monitorowanie pęknięć, a w przypadku zbiorników także ubytków korozyjnych prowadzących do rozszczenia. Najczęściej obiekty stalowe są badane metodami defektoskopii ultradźwiękowej, jednakże nie w każdym miejscu konstrukcji można umieścić głowice ultradźwiękowe. Zachodzi też konieczność monitorowania rozwoju wykrytej wady. W wymienionych okolicznościach wskazane jest zastosowanie metody EA. Badania diagnostyczne w trakcie obciążania lub w czasie eksploatacji zbiorników i instalacji ciśnieniowych są prowadzone m.in. w Japonii i USA

od początku lat siedemdziesiątych ub. wieku. Opublikowany w 1975 roku wykaz takich badań prowadzonych w USA przez 6 czołowych firm [11] zawierał 26 opisów badań instalacji w elektrowniach nuklearnych oraz 32 raporty z innych dziedzin przemysłu. Badano obiekty o znacznych rozmiarach, np. zbiornik na gaz płynny o średnicy 20 m i grubości ścianki 54 mm, poddawanego próbie ciśnieniowej, polegającej na podniesieniu ciśnienia w zbiorniku do wartości równej 150 % ciśnienia roboczego.

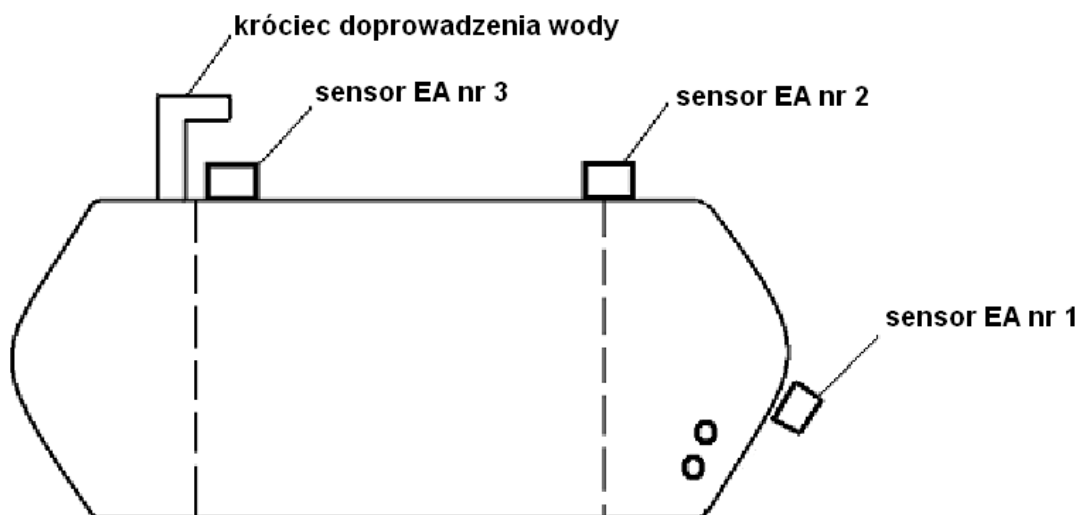
W związku z potrzebą opracowania standardowych procedur badania skomplikowanych obiektów, w których stany awaryjne mogłyby wywołać poważne zagrożenie środowiska, opracowano normę ASTM E 1139-07 [12], która zawiera następujące kryteria analizy przebiegu sumy zdarzeń EA w obiekcie:

- emisja od źródła aktywnego ma miejsce wówczas, gdy w trakcie wzrostu lub przetrzymywania hydrostatycznego obciążenia suma zdarzeń EA wzrasta w sposób jednostajny i żaden z chwilowych przyrostów zdarzeń nie przekracza 60 % zliczeń całkowitych,
- emisja od źródła intensywnego ma podobny przebieg, ale w rozpatrywanym przedziale przekraczane jest kryterium 60% chwilowego przyrostu w odniesieniu do całkowitej sumy zdarzeń,
- źródło krytycznie aktywne i krytycznie intensywne charakteryzuje się wyraźnym stopniowym powiększaniem rejestrowanych przyrostów sumy zdarzeń EA w kolejnych odcinkach czasu. Wykrycie takich źródeł powoduje zakwalifikowanie zbiornika jako niesprawnego.

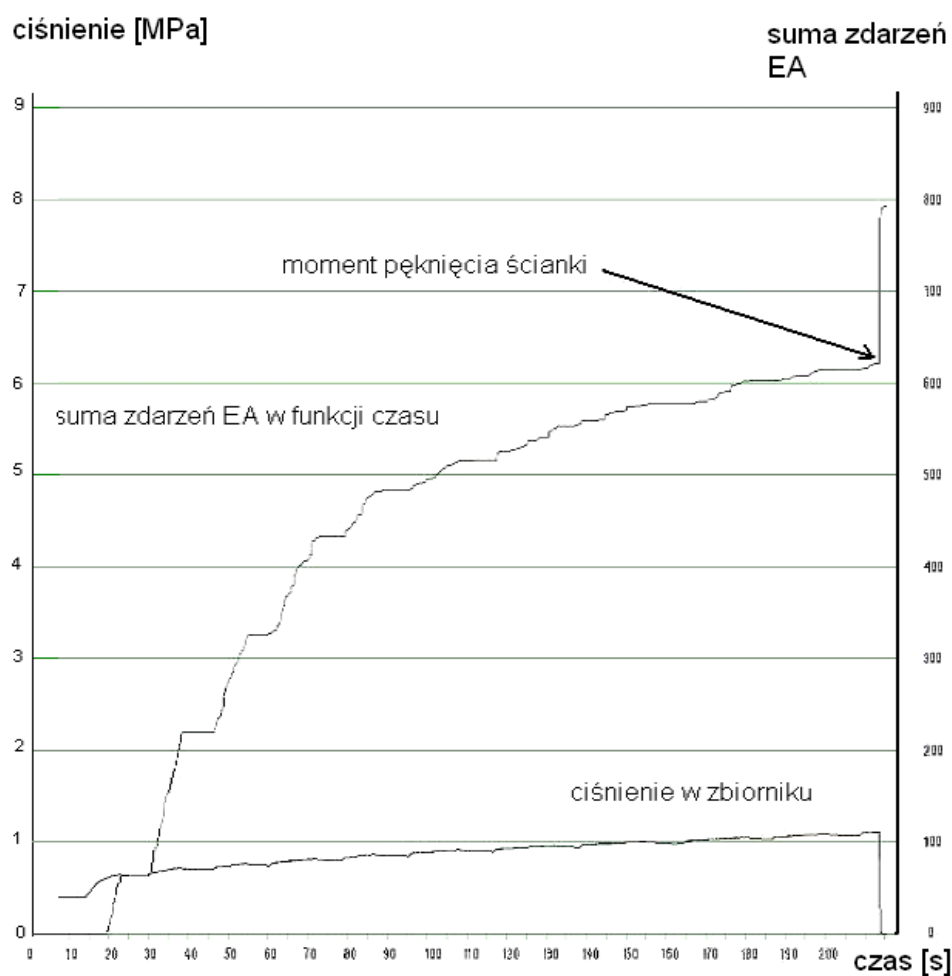
Typowy wykres sumy zdarzeń w funkcji obciążenia ma postać następującą. Na początkowym odcinku (ciśnienie niższe od roboczego) suma zdarzeń ma pomijalną wartość (do 10% sumy całkowitej). W trakcie dalszego wzrostu ciśnienia można zaobserwować odcinek wzmożonej aktywności akustycznej zbiornika. Źródłem emisji akustycznej są tu procesy zmiany kształtu zbiornika i naprężania się połączeń konstrukcyjnych. Proces ten powinien się zakończyć przed osiągnięciem ciśnienia próby (to jest ok. 150 % przewidywanego ciśnienia roboczego). Podczas dalszego zwiększania ciśnienia przyrosty zdarzeń EA powinny być zerowe lub wyraźnie niższe od poprzedniej fazy. W myśl zaleceń normy [12] się w trakcie tego etapu o braku rozwoju uszkodzenia świadczy przyrost nie większy niż 60 % zdarzeń zarejestrowanych w trakcie procesu wstępnego naprężania się konstrukcji. Krótkotrwałe wzrosty mające wartość powyżej podanej wymienianych 60 % stanowią podstawę do uznania zbiornika za uszkodzony. Znaczące przyrosty zdarzeń EA w trakcie chwilowego obniżania ciśnienia (do którego może dojść wskutek niedoskonałości użytej pompy) nie świadczą o złej jakości obiektu. Występowanie źródła aktywnego nie powoduje odrzucenia zbiornika, jest to przejaw typowych procesów deformacyjnych.

Jako przykład zastosowania opisaną wyżej procedury można podać opis badania duralowego zbiornika na paliwo o długości 3 m, średnicy 1200 mm i grubości ścianki 6 mm przeprowadzono w trakcie próby ciśnieniowej, opisany w [2]. Do rejestracji sygnału EA zastosowano trzykanałowy analizator EA wyposażony w sensory typu szerokopasmowego. Schemat rozmieszczenia sensorów na obiekcie pokazano na rys 9.

Na rys. 10 przedstawiono przebieg rejestracji w czasie sumy zdarzeń EA wykonany sensorem nr 3 oraz ciśnienia w trakcie próby, zmierzonego za pomocą wyskalowanego sensora tensometrycznego umieszczonego na przewodzie doprowadzającym wodę. W przedziale ciśnień 0 - 0,6 MPa zarejestrowano wysoki poziom sygnału EA, którego źródłem były procesy deformacji ścianek zbiornika. Po uzyskaniu ciśnienia 1,1 MPa nastąpiło pęknięcie ścianki zbiornika w pobliżu sensora nr 3., który zarejestrował w tym momencie najwyższy przyrost mierzonego parametru akustycznego. Wpływ wody przez to pęknięcie był źródłem sygnału EA o bardzo wysokim natężeniu.



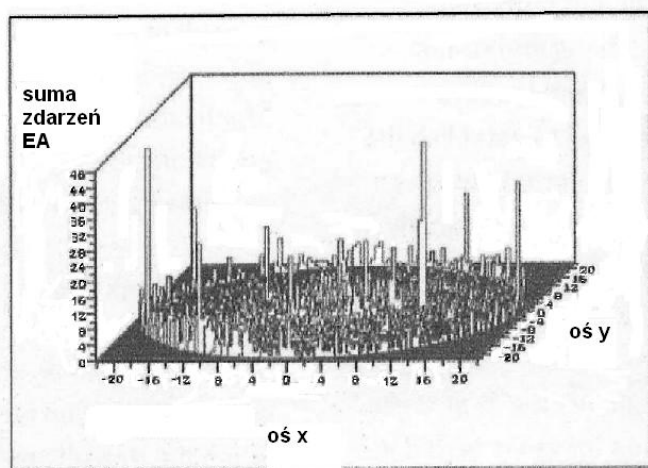
Rys. 9. Rozmieszczenie sensorów EA w trakcie próby hydrostatycznej zbiornika z duralu



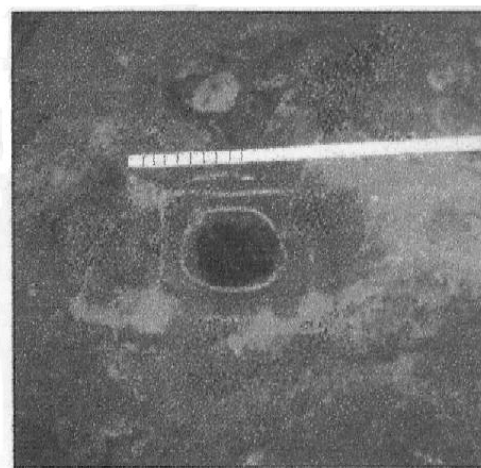
Rys. 10. Próba ciśnieniowa zbiornika z duralu. Przebieg rejestracji w czasie sumy zdarzeń EA wykonany sensorem nr 3 oraz ciśnienia w trakcie próby.

Podczas analizy wyników zarejestrowanych w trakcie próby ciśnieniowej należy pominąć typowy dla zbiorników etap wstępnego obciążania, ponieważ w tym czasie jest generowany sygnał EA o znaczącej intensywności, spowodowany wzajemnym przemieszczaniem się elementów konstrukcji zbiornika. Do oceny stanu technicznego zbiornika ciśnieniowego stosuje się wykresy sumy zdarzeń EA w funkcji czasu, natomiast wykresy energii sygnału EA mają znaczenie pomocnicze i używa się ich jedynie w celu porównania fragmentów wyników z zarejestrowanym przebiegiem rozwoju uszkodzeń o zidentyfikowanym położeniu i rozmiarze. Suma zdarzeń EA jest mało wrażliwa na oddalenie źródła sygnału od przetwornika pomiarowego i jest równocześnie bardziej czuła na krótkotrwałe sygnały charakteryzujące pękanie na niewielkich obszarach, nie zawiera informacji o energii procesu (rozmiarze uszkodzenia), natomiast energia sygnału EA zależy od rozmiaru uszkodzenia, ale jej wartość zależy od odległości sensor - uszkodzenie. Intensywne lub krytyczne natężenie sygnału EA jest wynikiem występowania wady, której identyfikacja jest możliwa przy użyciu dodatkowych metod, jednakże charakter przebiegu EA dla typowych wad ma charakter powtarzalny. W przypadku stwierdzenia zauważalnego i systematycznego wzrostu wskazań liczników EA (źródło krytycznie 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 stosuje się badania ultradźwiękowe i oględziny endoskopowe.

Oprócz badań zbiorników w trakcie próby hydrostatycznej stosuje się również monitorowanie sygnału EA generowanego przez skorodowane fragmenty obiektu w trakcie jego normalnej eksploatacji. Metodyka badań została opracowana przez francuską firmę Euro Physical Acoustics SA [13] w odniesieniu do zbiorników ropy naftowej. Podczas badań zbiornik jest wypełniany do maksymalnego poziomu i poddawany stabilizacji przez 6 – 24 godz. Następnie rozmieszcza się do 24 sensorów EA w dolnej części bocznej ściany zbiornika. Pomiar jest prowadzony przez 1 – 2 godz. Zarejestrowane dane są poddawane obróbce, w wyniku której oceniany jest stopień uszkodzenia zbiornika i lokalizowane źródła EA.



Lokalizacja źródeł sygnału EA w dnie zbiornika



Przykład otworu w dnie zbiornika spowodowanego korozją

Rys. 11. Rozkład przestrzenny sumy zdarzeń EA zarejestrowanych w trakcie monitorowania zbiornika do przechowywania ropy naftowej (z lewej). Typowy zidentyfikowany w ten sposób ubytek korozyjny w dnie zbiornika (z prawej)



Zarejestrowana aktywność akustyczna jest porównywana z wynikami zgromadzonymi w zebranej uprzednio bazie danych. Wynik badania stanowi podstawę do wydania orzeczenia do której z pięciu klas zaliczono zbiornik. W obiektach klasy A stwierdzony jest dobry stan techniczny z zaleceniem następnego badania po 4 latach. W obiektach klasy B stwierdzone są niewielkie uszkodzenia z zaleceniem badania po 3 latach. Obiekty klasy C charakteryzują się średnimi uszkodzeniami z zaleceniem przeprowadzenia oględzin wzrokowych powierzchni wewnętrznej w najbliższym terminie. Podobnie klasyfikowane są obiekty klasy D z tym, że uszkodzenia są uznane za znaczne. W klasie E stwierdza się uszkodzenia krytyczne i zaleca się jak najszybszą inspekcję wykrytych wad. W lewej części rys. 11 pokazano rozkład przestrzenny sumy zdarzeń EA zarejestrowanych w trakcie monitorowania zbiornika. Rozkład przestrzenny uzyskano stosując metodę lokalizacji źródeł EA. Obszary o podwyższonej aktywności sygnału EA wskazują na możliwość wystąpienia ubytku korozyjnego. Typowy zidentyfikowany w ten sposób ubytek korozyjny w dnie zbiornika jest pokazany w prawej części rys. 11.

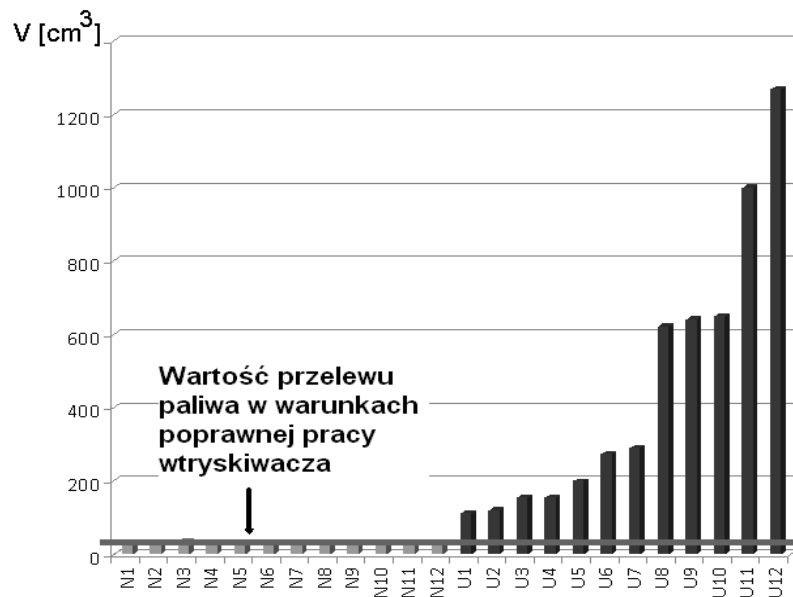
Podobną procedurę stosuje w USA *Federal Highway Administration* do badań eksploatowanych mostów stalowych [14]. Badania są prowadzone przy pomocy systemu o nazwie *Sensor Highway II*. System ten ma 16 kanałów do rejestracji sygnału EA umożliwiających kontrolę do 4 źródeł sygnału. Jest również wyposażony w 16 wejść do których można dołączyć sensory drgań, nacisku, ciśnienia, zbliżeniowe, mierniki temperatury i tensometry. Przewidziano zdalne sterowanie pracą systemu oraz transmisję wyników pomiarów do oddalonych baz danych. Do tego celu system zawiera modem telefoniczny, port sieci ETHERNET, port USB, port transmisji szeregowej RS232/485, a także możliwość podłączania urządzeń alarmujących w przypadku wykrycia stanów awaryjnych monitorowanej konstrukcji. Całość jest zabudowana w hermetyzowanym pojemniku przystosowanym do eksploatacji w terenie.

## **5. Badania uszkodzeń zasobnikowego układu wtryskowego**

W wyniku doświadczeń zebranych w trakcie pracy zawodowej związanej z serwisowaniem silników wysokoprężnych z zasobnikowym układem wtryskowym diagności dokonali zestawienia procentowego udziału najczęstszych przyczyn awarii tych maszyn. Należą do nich awarie: układu paliwowego (70%), sterowania (11%), układu tłokowo-korbowego (4%). Przewaga awarii układu paliwowego wynika z faktu, że poprawne działanie tego układu zależy od stanu bardzo precyzyjnych elementów działających w warunkach występowania wysokiego ciśnienia i znacznych przyspieszeń typu impulsowego, przy czym niewielkie uszkodzenia mechaniczne tych elementów wywołują spadek ciśnienia w zasobniku uniemożliwiając rozruch silnika. Najczęstszym uszkodzeniem układu wtryskowego jest awaria zaworu sterującego dawką paliwa we wtryskiwaczu, powodująca jego nadmierny wypływ do kanału przelewowego i spadek ciśnienia w zasobniku. Nie stwierdzono, aby przyczyną tego uszkodzenia było naturalne zużycie elementu, ponieważ wykrywano awarie zarówno po kilkudziesięciu jak po kilkuset godzinach eksploatacji silnika. W związku z tym opracowano procedurę diagnostyczną mającą na celu identyfikację niesprawnego wtryskiwacza w trakcie jego pracy na działającym silniku [19,20]. Przykładowe badania były prowadzone na czterocylindrowym silniku przemysłowym, rzędowym firmy Perkins o mocy 102 kW przy 2200 obr/min.

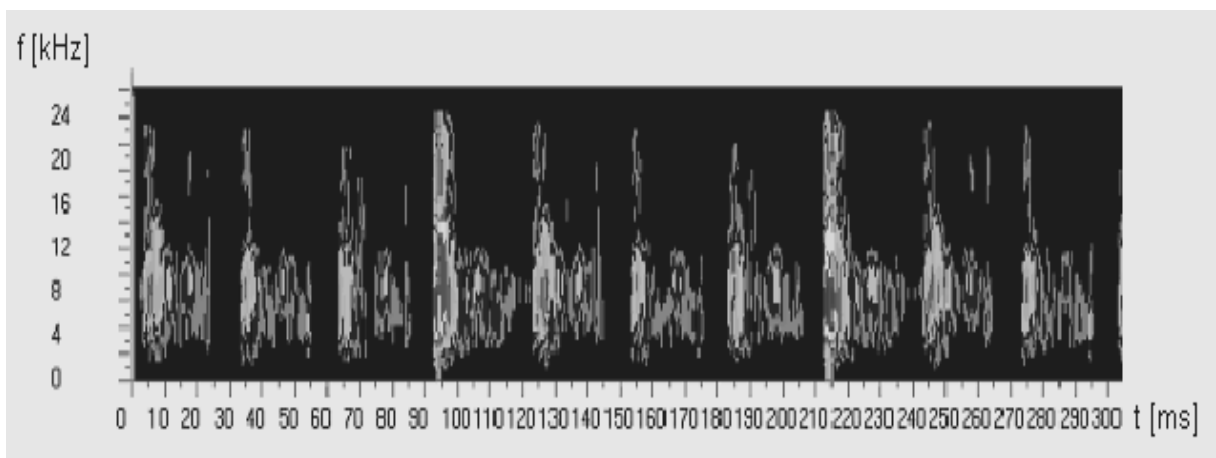
Dla potrzeb zidentyfikowania populacji wtryskiwaczy charakteryzujących się nadmiernym przelewem w trakcie pracy skonstruowano oryginalne urządzenie do pomiaru objętości paliwa kierowanego do kanału przelewowego z wtryskiwacza. Wypływ paliwa z komory sterującej wtryskiwacza skierowany jest poprzez wspomniany odpływ na zewnątrz przewodem, którym paliwo spływa do skalowanej menzurki. Część dolna urządzenia gromadzi paliwo wypływające z rozpylacza. Z danych zamieszczonych w dokumentacji

technicznej badanego silnika określono maksymalną dopuszczalną wielkość przelewu na  $120 \text{ cm}^3$  podczas pomiaru trwającego 3 minuty przy obrotach 1000 obr/min na biegu jałowym. Wyniki pomiarów przelewu w populacji 24 wtryskiwaczy pokazano na rys. 12.



Rys. 12. Wyniki pomiarów przelewu w populacji 24 wtryskiwaczy układu Common Rail wykonanych w celu identyfikacji egzemplarzy uszkodzonych

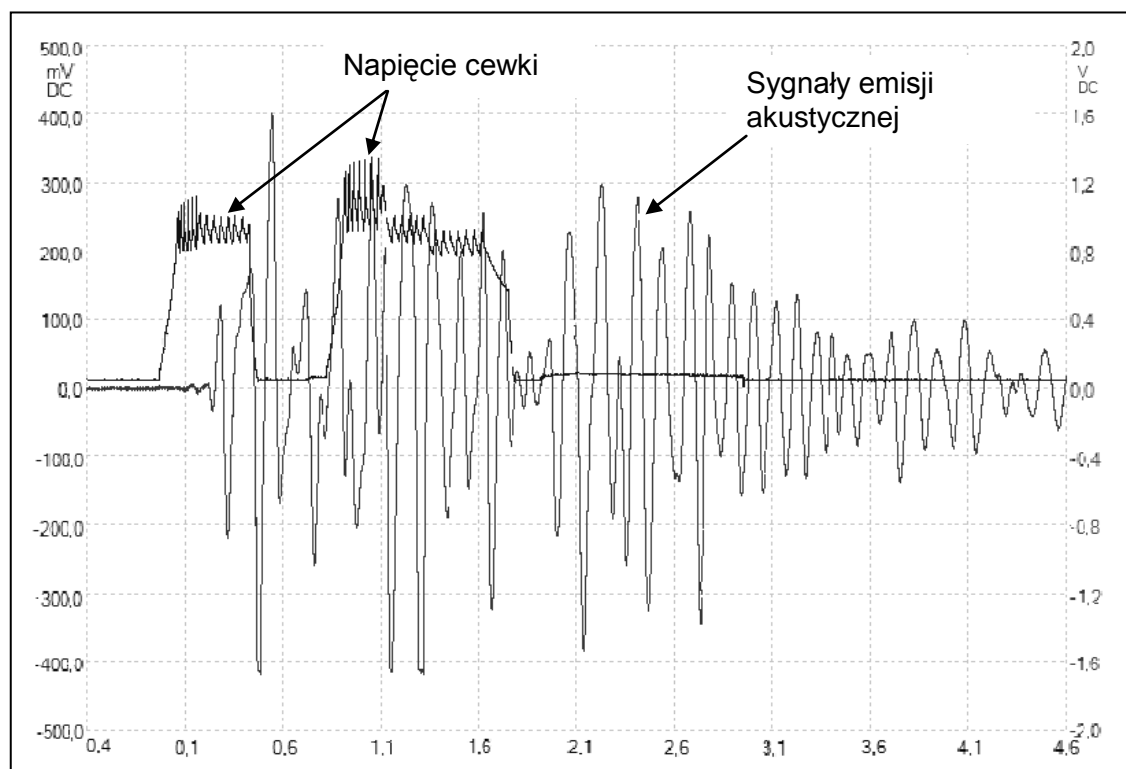
Na Rys. 13 pokazano spektrogram sygnału emisji akustycznej zarejestrowany w trakcie pracy silnika cztero-cylindrowego. Zakres czasowy obejmuje dwa takty pracy silnika. Na spektrogramie widoczne są momenty aktywności akustycznej czterech wtryskiwaczy, przy czym wtryskiwacz badany (t.j. ten na którym umieszczono sensor EA) jest przedstawiony jako źródło sygnału o największej energii, ponieważ elementy tego wtryskiwacza znajdują się najbliżej sensora. Porównanie odwzorowania sygnału EA pochodzącego od wtryskiwaczy sprawnych i uszkodzonych nie przyniosło efektywnych rezultatów z powodu zbyt niskiej rozdzielczości w dziedzinie czasu możliwej do uzyskania na spektrogramie.



Rys. 13. Wykres częstotliwościowo-czasowy (spektrogram) przedstawiający aktywność akustyczną pracującego wtryskiwacza układu Common-Rail

W celu identyfikacji wtryskiwaczy uszkodzonych stosuje się specjalnie opracowane oprogramowanie, które pozwala na określenie czasu trwania charakterystycznych segmentów w sygnale EA z dokładnością do 100 mikrosekund. Widok sygnału EA w wyższej rozdzielczości czasowej łącznie z przedstawionym napięciem zasilającym cewkę sterującą wtryskiem pokazano na Rysunku 14. Na tym rysunku sygnał EA - przedstawiony kolorem jaśniejszym- ma postać trzech impulsów o łącznym czasie trwania ok. 3 milisekund. Dwa pierwsze impulsy są generowane w wyniku pracy kotwicy elektromagnesu zaworu sterującego wtryskiem paliwa. Po tych impulsach następuje przerwa trwająca ok. 0,6 ms, a następnie iglica wtryskiwacza w wyniku uderzenia w gniazdo generuje trzeci z impulsów o czasie trwania ok. 0,8 milisekundy. Zapis cyfrowy tego procesu wykonany przy pomocy przenośnego analizatora EA zawiera 150 próbek sygnału. Oprogramowanie diagnostyczne umożliwia określenie czasu trzech segmentów (faz) sygnału:

- I - faza aktywności kotwicy cewki sterującej wtryskiem;
- II - faza wzrostu ciśnienia działającego na iglicę wtryskiwacza;
- III - faza aktywności iglicy wtryskiwacza.



Rys. 14. Przebieg napięcia zasilającego cewkę sterującą wtryskiem w trakcie przedwtrysku i wtrysku właściwego (kolor ciemniejszy) oraz sygnał emisji akustycznej generowany przez kotwicę elektromagnesu zaworu sterującego oraz przez iglicę wtryskiwacza (kolor jaśniejszy) - oba sygnały pokazane w funkcji czasu ich trwania, podanego w milisekundach

Tabela 5.1 Reguły klasyfikacyjne wtryskiwaczy w zależności od czasu trwania sygnału EA wtrysku paliwa.

Warunek dla $\Delta$ , II faza	Warunek dla $\Delta$ , III faza	Przyporządkowanie do klasy 0-nieuszkodzony, 1-uszkodzony
t [ms]	t [ms]	
dowolne	$\leq 14 \%$	1
dowolne	$> 14 \%$ and $< 38 \%$	0
dowolne	$\geq 38 \%$	1

Tabela 5.2. Zestawienie ilości trafnych wskazań reguł klasyfikacyjnych zastosowanych do klasyfikacji populacji wtryskiwaczy zaprezentowanej w Tabeli 5.1.

Macierz klasyfikacji	Obserwowana wartość 0-nieuszkodzony	Obserwowana wartość 1-uszkodzony	Suma
Przewidywana wartość wg reguł klasyfikacyjnych przedstawionych w Tabeli 2 0-nieuszkodzony	12	0	12
Przewidywana wartość wg reguł klasyfikacyjnych przedstawionych w Tabeli 2 1-uszkodzony	0	6	6
Suma	12	6	18
Procent trafności	100 %	100 %	100 %

Wyniki pomiarów średnich czasów trwania trzech podanych wyżej faz, odchylenia standardowe i współczynniki zmienności wyznaczone dla populacji 60 pomiarów dla każdego z 18 zbadanych wtryskiwaczy pozwoliły na wyciągnięcie wniosku, że średni czas trwania sygnału EA w fazie pierwszej nie jest istotny przy klasyfikacji wtryskiwaczy do jednego z dwóch klas: uszkodzone bądź nieuszkodzone, natomiast możliwe jest stworzenie pewnych reguł klasyfikacji w oparciu o średni czas trwania drugiej i trzeciej fazy. Reguły takiej klasyfikacji przedstawiono w Tabeli 5.1. Odsetek prawidłowo i nieprawidłowo zaklasyfikowanych wtryskiwaczy w oparciu o przedstawioną wyżej regułę zastosowaną do wyników pomiarów populacji 18 wtryskiwaczy zebrano w Tabeli 5.2. Łączny współczynnik trafności wszystkich zaklasyfikowanych wtryskiwaczy wynosi 100%, co sugeruje przydatność opisaną procedurę do stosowania w praktyce.

### Literatura

- [1] *Grosse Ch., Ohtsu M.* (editors): Acoustic Emission Testing. Basic for Research-Applications in Civil Engineering. Springer, ISBN 978-3-540-69895-1, 2008, rozdział 7.
- [2] Ranachowski Z. Metody pomiaru i analiza sygnału emisji akustycznej. Prace IPPT PAN, 1/1997.
- [3] Rüsç H. Physical problems in testing of concrete, Zement-Kalk-Gips, Vol. 12, 1, 1959, 1-9.
- [4] Rindorf H. Acoustic Emission Source Location, Brüel & Kjaer Technical Review, No 2 - 1981, ISSN 0007-2621, Naerum, 1981.

- [5] Parmar D. Non-Destructive Bridge Testing and Monitoring with Acoustic Emission (AE) Sensor Technology, Final Report, [www.biz.hampton.edu/esitac/docs/nondestructivetesting](http://www.biz.hampton.edu/esitac/docs/nondestructivetesting), 2009
- [6] Ranachowski Z., Glinicki M.A., Nowojejski G., Zastosowanie metody emisji akustycznej do identyfikacji składników betonu przy pomiarach mikrotwardości, *Cement Wapno Beton XV/LXXVII*, 4, 2010, 202 - 209.
- [7] Recommended practice for in situ monitoring of concrete structures by acoustic emission. Japan Society for Non - Destructive Inspection, code NDIS 2421, Tokyo, 2000.
- [8] Gołaski L., Goszczyńska B., Świt G, Trompczyński W. System monitoringu unozliwiający globalną ocenę stanu technicznego obiektów betonowych, *Materiały 56 Konferencji Diagnostyka, monitoring i modernizacja eksploatowanych obiektów budowlanych Kielce - Krynica*, wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2010, 173 - 187.
- [9] Hsu T., Slate O., Sturman G., Winter G. Microcracking of plain concrete and the shape of the stress - strain curve, *J. Amer. Concr. Institute*, 60, 1963, 209 - 224.
- [10] Moczko A. Emisja akustyczna w badaniach betonu, *Inżynieria i Budownictwo*, 1, 1996, 42-46.
- [11] Kishi T. Ohtsu M. *Acoustic Emission - Beyond the Millenium*, Elsevier, ISBN 0 08 0438512, Oxford, 2000.
- [12] Nichols R.W.(editor) *Acoustic Emission*. Applied Science Publishers LTD, London, 1976.
- [13] Standard Practice for Continous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries, [www.astm.org/search/acoustic emission](http://www.astm.org/search/acoustic%20emission)
- [14] [www.epandt.com/tankpac.html](http://www.epandt.com/tankpac.html)
- [15] [www.tfhr.gov/hnr20/nde/acoustic.htm](http://www.tfhr.gov/hnr20/nde/acoustic.htm)
- [16] *Dziennik Ustaw*, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dn. 16.02.2005
- [17] *Dziennik Ustaw*, Zarządzenie nr 14 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dn. 17. 07.2005.
- [18] Katalog Polskich Norm: - PN EN 1330-9 - Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną; PN EN 13477-1 - Charakterystyka aparatury - Część 1: Opis aparatury; PN EN 13477-2 -I.Charakterystyka aparatury - II. Weryfikacja działania; PN EN 13554 - Emisja Akustyczna - Zasady Ogólne.
- [19] Ranachowski, Z.. Bejger A., Fault diagnostics of the fuel injection system of a medium power maritime diesel engine with application of acoustic signal, *Archives of Acoustics*, 30, 4, pages: 465-472 , 2005.
- [20] Bejger A.: *Zastosowanie fal sprężystych emisji akustycznej do diagnozowania układów wtryskowych okrętowych silników spalinowych*, wyd. Fotobit, Kraków 2012.

