

Emisja akustyczna i jej zastosowanie w technice

Jedną z podstawowych przyczyn przyspieszonej degradacji izolacji urządzeń elektroenergetycznych są wyładowania niezupełne (WZN). Diagnostykę skali występowania WZN w izolacji transformatorowej wysokiego napięcia umożliwiają obecnie trzy metody pomiarowe: elektryczna, chromatografii gazowej i emisji akustycznej (EA). Ta ostatnia metoda jest stosowana w praktycznej diagnostyce w Instytucie Energetyki (Warszawa-Mory) i rozwijana na Wydziale Elektrycznym Politechniki Opolskiej.

Terminem emisja akustyczna (EA) określa się zjawisko generacji i propagacji fal sprężystych w różnych ośrodkach stałych i cieczech. Źródłem tych fal są różnorodne procesy rozwoju mikropęknięć, generacja i anihilacja dyslokacji, wzajemne przemieszczanie się fragmentów badanego ośrodka połączone z tarciem a także energetyczne procesy relaksacyjne związane z generacją WZN. Metoda EA jest obecnie szeroko stosowana przy badaniu własności mechanicznych oraz przemian fazowych różnych obiektów w wielu dziedzinach nauki i techniki.

Pierwsze konstrukcje aparatury do rejestracji sygnału EA, które powstały w latach trzydziestych były modyfikacją używanych w tych czasach urządzeń elektroakustycznych. F.Kishinouya skonstruował w 1933 roku urządzenie do rejestracji sygnału EA generowanego w procesie zginania próbek drewnianych. Jako przetwornik sygnału zastosował 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 w latach trzydziestych XX w. sygnały EA towarzyszące przemianie austenit - martenzyt w stali. 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 ceramiką piezoelektrycznej. Umożliwiło to rejestrację sygnału EA generowanego przez procesy związane z ruchem dyslokacji w kryształach cyny i kadmu.

Analityczny opis zjawiska, będącego podstawą pomiarów metodą EA jest bardzo złożony. W pracach teoretycznych omawiana jest *teoria promieni*, w której każda z dróg propagacji sygnału od źródła do punktu obserwacji jest uwzględniana jako odrębny komponent w równaniach elastodynamiki. Przy przyjęciu założeń upraszczających, że w źródle EA funkcja amplitudy zmian pola naprężeń ma postać skoku jednostkowego, punkt obserwacji znajduje się w polu dalekim a fala sprężysta propaguje się w ośrodku jednorodnym podstawowe równanie elementarne opisujące drogę propagacji sygnału opisuje następującą zależność podawana w literaturze:

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

gdzie:

$\gamma_{ij}(r; t'-t; r)$ – funkcja Greena dla przemieszczenia w kierunkach x'_i, y'_j, z'_i w punkcie r w chwili t' , w przypadku, gdy źródłem tych przemieszczeń jest lokalne zaburzenie pola naprężeń w punkcie r w chwili t ,

ρ – gęstość ośrodka [kg/m³],

v_p – prędkość fali dylatacyjnej,

v_s – prędkość fali ścinania,

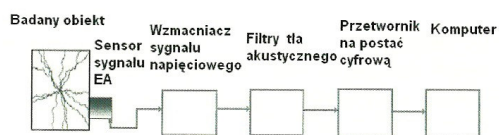
γ_i, γ_j – dla $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$ cosinusy kierunkowe źródło-odbiornik oraz odbiornik-źródło,

r – odległość pomiędzy źródłem EA a sensorem,

δ_{ij} – delta Kroneckera,

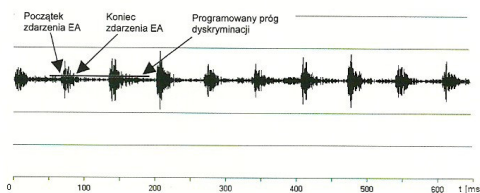
$\delta(x)$ – funkcja delta równa $+\infty$ dla $x = 0$ oraz równa 0 dla pozostałych wartości x .

W praktyce odbiornik sygnału EA – *sensor* – znajduje się na powierzchni badanego ośrodka i rejestruje w tym punkcie sygnał w funkcji czasu a na podstawie jego analizy wnioskuje się o własnościach źródeł tego sygnału albo o własnościach ośrodka, w objętości którego sygnał się propaguje. Powszechnie stosowaną obecnie metodą rejestracji sygnału EA jest użycie do tego celu komputerów. Oprócz koniecznego wzmocnienia sygnału i usunięcia z niego niepożądanych komponentów (szumów, zakłóceń) należy dokonać przetworzenia sygnału analogowego na postać cyfrową, czyli dyskretną pod względem wartości i dyskretną w dziedzinie czasu i dopiero w tej postaci sygnał EA podlega dalszej obróbce. Poniżej przedstawiono schemat blokowy aparatury do pomiaru emisji akustycznej.



Rysunek 1. Schemat blokowy systemu do pomiaru emisji akustycznej

Problem odtworzenia dokładnej postaci sygnału EA generowanego w źródle emisji jest nadal w praktycznych rozwiązaniach zbyt złożony i prowadzi do utworzenia zbyt licznych zbiorów danych. Dlatego badania naukowe różnych ośrodków wymagają opracowania wyspecjalizowanych procedur rejestracji i analizy sygnału. Procedury potrzebne do badań zaplanowanych przez autorów niniejszego opracowania opisano poniżej. W ogólności metody analizy sygnału EA polegają na klasyfikowaniu postaci jego przebiegu zmienności w funkcji czasu na podstawie zmian napięcia rejestrowanego na sensorze. Podstawową metodą charakteryzowania sygnału EA implementowaną programowo w nowoczesnym analizatorze EA i charakteryzującym zmiany intensywności tego sygnału jest detekcja *zdarzeń emisji akustycznej* (umownych elementów sygnału EA).



Rysunek 2. Sposób określania początku i końca zdarzenia w sygnale emisji akustycznej. Sygnał EA jest generowany przez układ wtryskowy silnika Diesla

Oprócz sygnału EA aparatura rejestruje również szum tła akustycznego i szum generowany w torze obróbki rejestrowanego sygnału. W trakcie przetwarzania sygnału z postaci analogowej na cyfrową generowany jest tzw. *szum kwantyzacji* wynikający z procesu zaokrąglania chwilowej wartości sygnału do poziomów składających się na binarną postać zapisu. Jeśli zakres przetwarzanego sygnału oznaczymy jako $L[V]$, to różnice kolejnych poziomów w przetwarzaniu analogowo-cyfrowym z rozdzielczością K -bitową wynoszą $\Delta L = L/2^K$. Zmniejszenie szumu kwantyzacji osiągnięto przez zastosowanie nowoczesnych przetworników analogowo-cyfrowych o dużej liniowości przetwarzania i rozdzielczości 12 bitów w optymalnym zakresie napięć wejściowych, wynoszącym ± 5 woltów. Na rysunku 2 naniesiono linię wyznaczającą maksymalny poziom napięcia szumu tła otoczenia. Poziom ten określa się jako „napięcie dyskryminacji”. Wystąpienie zdarzenia EA jest definiowane jako moment wzrostu chwilowej wartości sygnału powyżej napięcia dyskryminacji, a czas trwania zdarzenia EA jest wyznaczany do momentu zmniejszenia się chwilowej wartości sygnału poniżej napięcia dyskryminacji. Metodyka analizy sygnału zaproponowana przez autorów uwzględnia detekcję zdarzeń z możliwością softwareowego zwiększania/zmniejszania poziomu napięcia dyskryminacji. Istotnym czynnikiem wpływającym na poziom czułości aparatury do analizy sygnału EA jest, jak to nadmieniono wyżej, *okres próbkowania zastosowanego przetwornika analogowo cyfrowego*. Przykładem szybkiej karty przetwornika analogowo-cyfrowego powszechnie stosowanego w pomiarach EA jest karta typu 9812 firmy ADLINK, zaprojektowana dla komputerów PC i pracująca w standardzie PCI. Urządzenie to charakteryzuje się możliwością programowej zmiany stosowanej częstotliwości próbkowania w zakresie 0,001–20 Msamples/s, 12-bitową rozdzielczością oraz udostępnioną biblioteką procedur obsługi dogodną w implementacji przy projektowaniu oprogramowania służącego konkretnym procedurom pomiarowym. Zastosowanie karty przetwornika analogowo-cyfrowego wraz z nowoczesnym oprogramowaniem umożliwiło zwiększenie czułości aparatury wykrywającej zdarzenia EA o rząd wielkości. Zarejestrowane w programowej tabeli rejestru zdarzeń EA indeksy początku i jego końca mogą posłużyć do wyznaczenia czasu trwania zdarzenia EA. Energię E zdarzenia EA wyznacza się ze wzoru przybliżonego

$$E = 0.5 v_{max}^2 \cdot \Delta t,$$

gdzie:

v_{max} oznacza wartość maksymalną sygnału EA w trakcie trwania zdarzenia,

Δt – czas trwania zdarzenia EA.

Różnice w sygnale emisji akustycznej generowanym przez różne źródła w badanym obiekcie można analizować badając zmiany jego *charakterystyki widmowej*. Ciągły sygnał emisji akustycznej $v(t)$ w wybranym skończonym przedziale czasu można przedstawić się jako funkcję jego charakterystyki widmowej $A(\omega)$, gdzie ω jest pulsacją częstotliwości f , określoną jako $\omega = 2\pi f$. Przy założeniu bezwzględnej całkowalności, funkcja $v(t)$, jest liniowo przekształcana na funkcję gęstości widmowej $A(\omega)$ według poniższego wzoru (przekształcenie Fouriera):

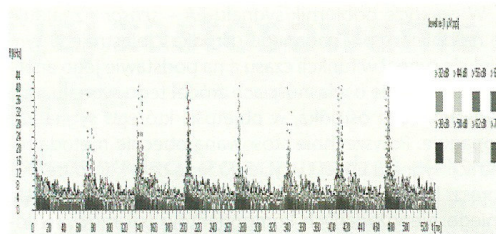
$$v(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} A(\omega) \exp(j\omega t) d\omega.$$

Autor niniejszego artykułu opracował procedurę wyznaczania funkcji gęstości widmowej $A(\omega)$ dla kolejnych segmentów dyskretnego zbioru próbek sygnału EA wraz z odpowiednią graficzną prezentacją wyników. Została tu zastosowana metoda okienkowego cyfrowego przekształcenia Fouriera (STFT). Wybór rozmiaru segmentu zależy od rodzaju badanego obiektu. W przypadku badań własności mechanicznych metali, stopów i kompozytów sygnał EA może być dzielony na większe segmenty, np. o kilkusekundowym czasie trwania. Omawiana procedura dzieli zarejestrowany sygnał na segmenty o wymaganym rozmiarze. Potem następuje sprawdzenie, czy w segmencie jest zawarte zdarzenie emisji akustycznej za pomocą algorytmu opisanego w poprzednim paragrafie. Następnie wyznaczana jest dyskretna postać funkcji gęstości widmowej przy wykorzystaniu kilku tysięcy próbek sygnału sąsiadujących z centralną próbką wykrytego zdarzenia emisji akustycznej. W wyniku zastosowania procedury opisanej powyżej uzyskuje się eliminację wpływu zakłóceń tła, co minimalizuje zniekształcenia wyznaczanej charakterystyki widmowej. Algorytm przekształcający zbiór próbek sygnału na zbiór współczynników gęstości widmowej $c_n : v(m) \rightarrow c_n(\omega)$ jest realizowany według wzoru przybliżonego :

$$c_n \approx \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} v(m) \cdot \text{mod} (e^{-jn2\pi m/N}),$$

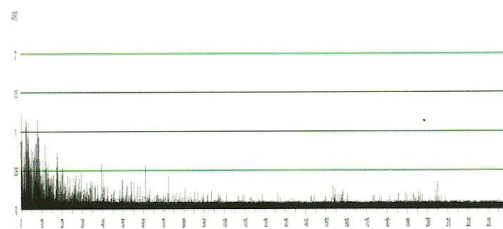
gdzie j oznacza $\sqrt{-1}$, a mod - moduł wyrażenia zespolonego.

Na rysunku 3. przedstawiono akustogram zbioru zdarzeń EA pokazanych uprzednio w zależności amplituda sygnału – czas na rysunku 2. Na osi poziomej rysunku 3 przedstawiono czas, natomiast na osi pionowej – częstotliwość. Charakterystyka widmowa sygnału została przedstawiona co 0,5 ms. Dyskretny odpowiednik funkcji gęstości widmowej $A(\omega)$, jest zobrazowany w postaci kodu kolorowego (przedstawionego tutaj w wersji czarno – białej). Na rysunku 4 przedstawiono przebieg czasowy wartości skutecznej sygnału EA, natomiast rysunku

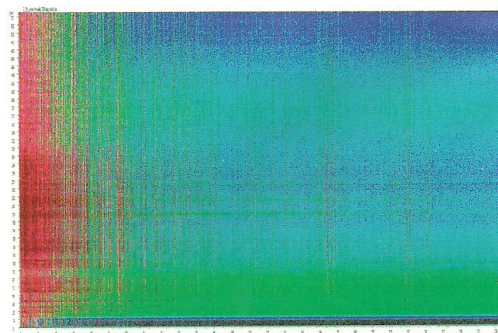


Rysunek 3. Akustogram zbioru zdarzeń EA, które wcześniej pokazano na rys. 2 w postaci zależności amplitudy sygnału od czasu

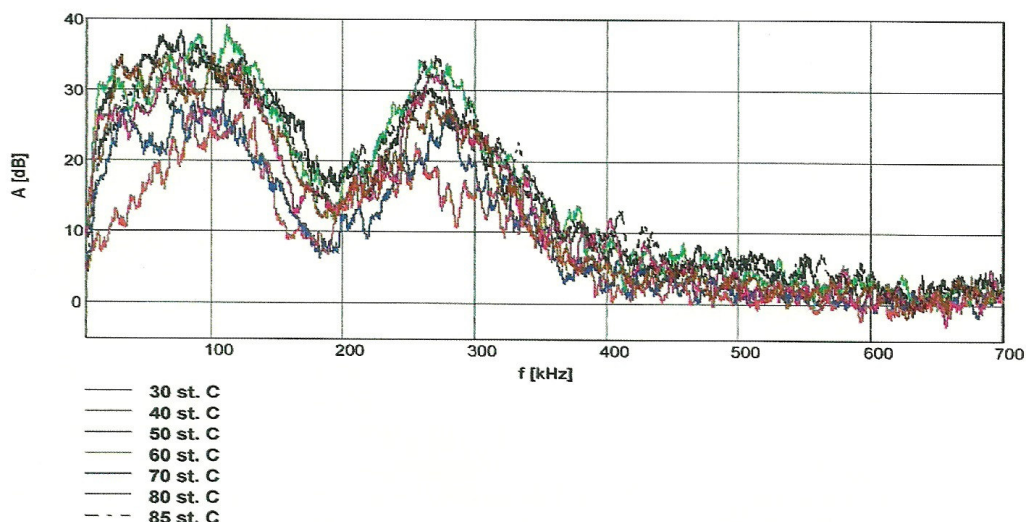
4 przedstawia akustogram tych samych danych skonstruowany dla sygnału EA analizowanego w przedziale 1-600 kHz. Prezentowane dane zostały zarejestrowane w trakcie procesu hartowania próbki wykonanej ze stali austenitycznej 1H18N9 (temperatura medium oziębiającego 373 K).



Rysunek 4. Przebieg czasowy wartości skutecznej sygnału EA, analizowanego w przedziale 1-600 kHz procesu hartowania próbki wykonanej ze stali austenitycznej 1H18N9 i zapisanego w pliku o rozmiarze 0,6 Gb



Rysunek 5. Akustogram procesu pokazanego na rysunku 4 w postaci przebiegu czasowego



Rysunek 6. Widma amplitudowe sygnału emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne w modelowym układzie eksperymentalnym, zbudowanym na Wydziale Elektrycznym Politechniki Opolskiej

Rysunek 6 pochodzi z opracowania naukowego pt. „Dobór parametrów sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niezupełnych dla potrzeb systemu eksperckiego” autorstwa prof. Tomasza Boczara, dr. Andrzeja Cichonia i dr. Sebastiana Boruckiego. Opracowanie zostało wydane przez Politechnikę Opolską w 2009 roku. Na rysunku przedstawiono widma amplitudowe sygnału emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne w modelowym układzie eksperymentalnym. Układ eksperymentalny składał się z kadzi, w której znajdował się fabrycznie nowy olej transformatorowy. Do układu dołączono komorę z grzałką i termostatem, co umożliwiało zmianę temperatury oleju. Wyładowania niezupełne były wytwarzane w układzie elektrod zanurzonych w oleju i dołączonych do transformatora probierczego. Sygnał emisji akustycznej był rejestrowany za pomocą hydrofonu pomiarowego umieszczonego w oleju.

PODSUMOWANIE

Metoda emisji akustycznej znajduje zastosowanie w identyfikacji procesów zachodzących w trakcie obciążania mechanicznego i przemian fazowych w różnych obiektach inżynierskich. Metoda jest także stosowana w diagnostyce stanu izolacji układów wysokonapięciowych.

Zbigniew Ranachowski

ETYKIETA EUR-ACE[®]

Europejska sieć akredytacji edukacji inżynierskiej ENAEE działa już prawie 4 lata. Zdołała ona skupić zainteresowanie głównych aktorów tego wykształcenia w Europie i zwrócić uwagę stowarzyszeń inżynierskich, agencji zapewnienia jakości i instytucji wyższego wykształcenia na świecie. Opracowano normy i kryteria EUR-ACE[®] (etykiety European Accredited Engineering). Ta europejska etykieta jakości została przyznana ponad 400 programom pierwszego i drugiego cyklu przez upoważnione agencje w ciągu zaledwie 2 lat. Ogólne zebranie ENAEE postanowiło wystąpić z inicjatywą poparcia etykiety jakości EUR-ACE[®] w obrębie EHEA w celu zwrócenia uwagi na system ENAEE i EUR-ACE[®]. Zamierza się zwiększyć liczbę upoważnionych agencji i liczbę przyznawanych etykiet jakości. Jednym z pierwszych kroków tej inicjatywy jest opracowanie nowych informacji dla studentów, ich rodziców, instytucji szkolnictwa wyższego, stowarzyszeń inżynierskich, przedsiębiorców, agencji zapewnienia jakości i innych, odnośnie intencji i zalet systemu EUR-ACE[®]. Ten nowy materiał zapewni nowoczesnością i jednolitą strukturą ENAEE i EUR-ACE[®]. Inicjatywa rozpoczęła się w styczniu 2010 roku i jest zaprojektowana na cały rok i będzie kierowana przez panią Jana Mohren, sekretarkę EUR-ACE[®] Label Committee (kierowniczkę programu w ASIIN Niemcy) odpowiedzialną za kilka projektów europejskich. (ah)

EANI NEWS The European Engineers 02.2010 str. 16