



RID II (Rozwój Innowacji Drogowych)
**Diagnostyka sprężonych oraz ciągnowych drogowych obiektów
inżynierskich, z uwzględnieniem doboru systemów monitoringu**



**PROCEDURA BADANIA METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ
SPRĘŻONYCH ORAZ CIĘGNOWYCH
DROGOWYCH OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH**

Opracował zespół: prof. dr hab. inż. Grzegorz ŚWIT

dr hab. inż. Aleksandra KRAMPIKOWSKA, prof. uczelni

Wydanie 3

Wydanie 2: Wylądowanie, Wylądowanie, Wylądowanie GDDKiA

11.06.2026, Warszawa

11.06.2026, Warszawa

SPIS TREŚCI	2
1. WSTĘP	3
2. KWALIFIKACJE OSÓB WYKONUJĄCYCH POMIARY METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ	4
3. APARATURA POMIAROWA	5
4. PRZYGOTOWANIE POMIARU	5
5. PROWADZENIE POMIARU	7
5.1. Badania wstępne	8
5.2. Badania zasadnicze	9
5.3. Badania uzupełniające	9
6. KRYTERIA OCENY USZKODZEŃ KONSTRUKCJI SPRĘŻONYCH ORAZ CIĘGNOWYCH DROGOWYCH OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH	10
6.1. Kryteria oceny stanu technicznego konstrukcji lub ich elementów	111
7. SPRAWOZDANIE Z BADAŃ METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ STANU TECHNICZNEGO KONSTRUKCJI STAŁOWYCH	14
7.1. Podstawę badań	14
7.2. Opis obiektu	14
7.3. Opis miejsca badań	14
7.4. Aparatura	14
7.5. Obciążenie	15
7.6. Uwagi dotyczące przebiegu rejestracji sygnałów emisji akustycznej	15
7.7. Dokumentacja pomiaru	15
7.8. Analiza wyników	15
7.9. Ocena stanu technicznego badanej konstrukcji wraz z uzasadnieniem	15
8. STOSOWANA TERMOLOGIA	16

1. WSTĘP

Procedura badań dotyczy sprężonych oraz ciągnowych drogowych obiektów inżynierskich metodą emisji akustycznej (AT) bazującej na analizie z wykorzystaniem bazy sygnałów wzorcowych, co pozwala na ocenę mechanizmów zachodzących w badanym elemencie wywołanych powstawaniem i rozwojem rys, pracą zakotwień, procesami korozyjnymi w betonie i stali miękkiej i sprężającej, uplastycznieniem, jak również pracą zakotwień w blokach kotwiących.

Ze względu na liczbę sprężonych oraz ciągnowych drogowych obiektów inżynierskich zaleca stosować się metodę emisji akustycznej jeżeli:

1. Główne elementy konstrukcyjne (dźwigary, płyta pomostu, przyczółki lub filary, pylony, łuki, bloki kotwiące, kable lub wieszaki z przeglądu stanu technicznego mają ocenę poniżej 4 lub całkowita ocena obiektu jest równa lub mniejsza niż od 3.
2. Obiekty inżynierskie narażone są na szkody górnicze lub inne zjawiska ekstremalne
3. W trakcie obciążeń próbnych celem uzyskania stanu zerowego obiektu i oszacowania rozwoju uszkodzeń w czasie dalszego użytkowania obiektu,
4. W trakcie przejazdów pojazdów ponadnormatywnych ze względu na masę na obiektach o znaczeniu strategicznym dla bezpieczeństwa ruchu dla zapewnienia bezpieczeństwa transportu oraz wykrycia ewentualnych uszkodzeń spowodowanych tym przejazdem.

Poniższe opracowanie obejmuje procedury badawcze dotyczących ocen uszkodzeń czynnych w obiektach sprężonych oraz ciągnowych.

Pomiary emisją akustyczną mogą mieć zastosowanie na konstrukcjach:

- kablobetonowych do oceny poprawności iniekcji wnętrza kanałów kablowych wykonanych z tworzywa sztucznego lub stalowych, co pozwala na wykrywanie pustek, nieciągłości iniektu lub iniektu o niskich parametrach mechaniczno-wytrzymałościowych. Wymagane jest do tego zastosowanie anten o płaskiej charakterystyce w zakresie 20-120 kHz,
- z blokami kotwiącymi celem lokalizacji inicjacji i propagacji rys w betonie oraz rozwoju procesów korozyjnych w kablu sprężającym,
- przeznaczonych do remontu dla zidentyfikowania i lokalizacji uszkodzeń oraz oceny stopnia zagrożenia, jakie uszkodzenia stanowią dla obiektu,
- po remoncie dla oceny jakości wykonanej naprawy a szczególnie stwierdzenia czy usunięto wcześniej wykryte uszkodzenia,
- podczas normalnej eksploatacji dla stwierdzenia czy w obiekcie znajdują się uszkodzenia stanowiące zagrożenie dla jej bezpieczeństwa użytkowania,
- uszkodzonych, ale ze względów strategicznych wymagających dalszego użytkowania; ciągłe monitorowanie pozwala na wyłączenie obiektów z ruchu w chwili niebezpiecznego wzrostu intensywności rozwoju uszkodzeń,

Do czasu wprowadzenia krajowych norm dotyczących procedur badań nieniszczących metodą emisji akustycznej, zaleca się stosować do ustaleń zawartych w wymienionych niżej normach europejskich

dotyczących terminologii, sposobu sprawdzania i cechowania układu pomiarowego, personelu badawczego:

- PN-EN ISO 9712:2022: Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących
- PN-EN 13554:2004/A1:2005 (U) „Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Zasady ogólne”
- PN-EN 13477-1:2002 (U) „Badania nieniszczące – Emisja Akustyczna – Charakteryzowanie aparatury – Część 1: Opis aparatury”
- PN-EN 1330-9:2002 - Badania nieniszczące - Terminologia stosowana w badaniach emisją akustyczną,
- PN-EN 13477-2:2002(U) Badania nieniszczące. Emisja akustyczna. Charakteryzowanie aparatury. Część 2. Weryfikacja działania.

2. KWALIFIKACJE OSÓB WYKONUJĄCYCH POMIARY METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ

2.1. Osoby wykonujące badania obiektów inżynierskich metodą AT muszą:

- a) posiadać udokumentowaną wiedzę z zakresu budownictwa lądowego w specjalności konstrukcyjnej lub mostowej,
- b) posiadać uprawnienia budowlane bez ograniczeń do kierowania robotami lub projektowania w specjalności konstrukcyjnej lub mostowej,
- c) posiadać min. certyfikat I-go stopnia (I°) – *szkolenie podstawowe - zgodnie z ISO 9712 w zakresie badań metodą AT* zorganizowane przez producentów aparatury pomiarowej AT lub krajowej jednostki specjalizującej się w badaniach AT
- d) podstawowych wiadomości o AT w tym:
 - terminologii, budowy i zasady działania aparatury do pomiaru AT,
 - sprawdzanie poprawności pracy oraz kalibracji aparatury pomiarowej,
 - obsługi użytej aparatury.

Zalecane jest również odbycie specjalistycznych kursów i szkoleń organizowanych przez producentów aparatury pomiarowej AT lub krajowej jednostki specjalizującej się w badaniach AT.

2.2. Osoby wykonujące interpretacje i analizy z badania obiektów inżynierskich metodą AT muszą::

- a) posiadać udokumentowaną wiedzę z zakresu budownictwa lądowego w specjalności mostowej,
- b) posiadać uprawnienia budowlane bez ograniczeń do kierowania robotami lub projektowania w specjalności konstrukcyjnej lub mostowej,
- c) posiadać min. certyfikat II-go stopnia (II°) *zgodnie z ISO 9712 w zakresie badań metodą AT, lub*
- d) pełnić funkcję eksperta technicznego w zakresie badań NDT dotyczących ultradźwięków lub emisji akustycznej lub badań georadarowych w Polskim Centrum Akredytacji, lub

- e) posiadać min. tytuł naukowy minimum doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport oraz mieć udokumentowane prace badawcze i eksperckie z wykorzystaniem metody emisji akustycznej w badaniu budowlanych konstrukcji mostowych i inżynierskich, min. 10 opracowań eksperckich z wykorzystaniem wielokanałowej emisji akustycznej oraz min. 5 artykułów w recenzowanych czasopiśmie międzynarodowych w tematyce zastosowania emisji akustycznej w badaniu konstrukcji budowlanych, lub
- f) odbyć studia podyplomowe z zakresu badań i interpretacji wyników metodą emisji akustycznej w instytucie naukowym lub uczelni posiadającej rekomendację Dyrektora GDDKiA.

3. APARATURA POMIAROWA

Zestaw aparatury pomiarowej do badań metodą emisji akustycznej składa się z:

- a) wielokanałowego (liczba kanałów nie powinna być mniejsza niż 12) procesora emisji akustycznej wraz z komputerem PC pozwalającym na rejestrację i przetwarzanie sygnałów AT oraz ich parametrów; procesor winien zawierać również zestaw filtrów sprzętowych umożliwiających rejestrację sygnałów w określonych pasmach częstotliwości,
- b) przedwzmacniaczy sygnałów AT (zazwyczaj o wzmacnieniu 40 dB) dla umożliwienia przesyłania sygnałów na większe odległości (do 150 m),
- c) czujników emisji akustycznej; są to piezoelektryczne przetworniki sygnałów AT (fali sprężystej) na sygnał elektryczny o częstotliwości 55 kHz i 150 kHz lub o płaskiej charakterystyce w zakresie 20-120 kHz i 100-400 kHz,
- d) przewodów łączących poszczególne elementy zestawu,
- e) uchwytów do mocowania czujników wyposażonych w elastyczne wkładki umożliwiające regulowany docisk czujników,
- f) programów umożliwiających rejestrację, przetwarzanie i prezentację wyników pomiaru,
- g) programu statystycznego umożliwiającego klasyfikację źródeł AT, np. NOESIS 12.0,
- h) bazy danych sygnałów wzorcowych adekwatnej do rozwiązywanych problemów,
- i) programu pozwalającego na lokalizację źródeł emisji akustycznej.

4. PRZYGOTOWANIE POMIARU

Przed pomiarem należy przeprowadzić dokładne oględziny badanej konstrukcji zwracając szczególną uwagę na rozmieszczenia potencjalnych defektów, jakość materiału z którego wykonana jest konstrukcja oraz inne elementy mogące mieć wpływ na propagację fal akustycznych. Należy sporządzić dokumentację fotograficzną oraz szkic obiektu z zaznaczeniem zauważonych uszkodzeń i ich opisem. Wykonać obliczenia statyczno-wytrzymałościowe konstrukcji z uwzględnieniem ewentualnych defektów w celu wskazania potencjalnych elementów do badań.

Przygotowanie obiektu i aparatury do badań obejmuje:

❖ Instalację uchwytów czujników AT

Uchwyty winny być tak skonstruowane i zamocowane na powierzchni badanego elementu, aby zapewnić kontrolowany docisk czujnika do konstrukcji (około 5 N). Na obiektach liniowych (belki) uchwyty mocujące czujniki należy przykleić na dolnej powierzchni belki równolegle do osi w takich odstępach, by tłumienie na odcinku między sąsiednimi czujnikami nie przekraczało wartości 10 dB. Na obiektach płaskich (płyty) czujniki należy rozmieścić na całej powierzchni elementu w taki sposób, aby wyznaczały naroża regularnych figur geometrycznych, np. trójkąty, trapezy.

❖ Wybór czujników

Zaleca się przeprowadzenie wstępnego monitoringu z zastosowaniem czujników szerokopasmowych. Analiza transformaty Fouriera sygnałów pozwoli na dobór czujników rezonansowych o optymalnej częstotliwości oraz na odpowiednie skonfigurowanie filtrów. Jeśli rezygnuje się z pomiarów wstępnych należy zastosować czujniki o płaskiej częstotliwości rezonansowej w zakresie 20 -120 kHz i 100-400 kHz.

❖ Montaż czujników AT

Powierzchnię, do której mocujemy czujniki należy oczyścić z zanieczyszczeń i przeszlifować papierem ściernym bądź kamieniem szlifierskim. Powierzchnię czujnika oraz badanego elementu należy pokryć warstwą silikonu. Po zamontowaniu czujników należy sporządzić szkic ich rozmieszczenia wraz z podaniem numerów seryjnych czujników. Jeżeli nie wykonujemy pomiaru tłumienia **to wówczas maksymalna odległość pomiędzy czujnikami nie może być większa niż 2,0 m.**

❖ Montaż przedwzmacniaczy AT

Przedwzmacniacz AT należy połączyć z czujnikiem przewodem o oporności 50 Ω i długości do 1 m. (Uwaga! Niektóre czujniki posiadają wbudowane przedwzmacniacze. W tych przypadkach czujniki należy połączyć kablem bezpośrednio z portem procesora.) Przedwzmacniacze należy połączyć z portem procesora kablem koncentrycznym o długości do 150 m i oporności 50 Ω .

❖ Programowanie aparatury pomiarowej

Programowanie polega na wybraniu parametrów sygnałów emisji akustycznej, które będą rejestrowane podczas monitoringu, filtrów częstotliwościowych oraz zaprogramowanie ustawień aparatury zgodnie z zaleceniem podawanym przez producenta aparatury.

Należy zaprogramować:

- *Hit definition time* (czas pomiędzy końcem sygnału a początkiem następnego); w badaniach konstrukcji sprężonych oraz ciągnowych drogowych obiektów inżynierskich zalecana jego wartość wynosi 200 μ s,
- *Rear time* (czas w ciągu którego kanał jest wyłączony i nie jest w stanie rejestrować sygnałów); czas winien być możliwie krótki nie dłuższy niż 100 μ s,
- Programowanie filtrów dostosowujące je do charakterystyk użytych czujników; w przypadku stosowania czujników rezonansowych o częstotliwości 20-120 kHz sygnały winny być rejestrowane w paśmie 20 - 100 kHz a dla czujników o częstotliwości 150 kHz sygnały należy rejestrować w paśmie 100 – 200 kHz. Powyższe nastawy należy traktować, jako standardowe. Stosowanie innych nastawów filtrów należy uzasadnić.

❖ Sprawdzenie poprawności pracy aparatury pomiarowej

Sprawdzenia dokonuje się przed i po pomiarze oraz każdorazowo po zmianie miejsca usytuowania czujników, co najmniej raz na dobę. Sprawdzenie polega na rejestracji amplitudy sygnału wzorcowego generowanego w odległości 5 mm od każdego z czujników. Źródłem sygnału wzorcowego jest sygnał Hsu-Nilsena towarzyszący łamaniu grafitu ołówka o średnicy 0,3 mm, twardości 2H i długości 3 mm nachylonego do powierzchni obiektu pod kątem 30°. Pomiar należy wykonać 3 razy przy każdym czujniku i określić średnią wartość amplitudy. Wartości amplitud sygnałów zarejestrowanych dla każdego czujnika nie powinny różnić się więcej niż o ± 3 dB od wartości średniej określonej dla wszystkich czujników.

5. PROWADZENIE POMIARU

Monitoring obiektu przeprowadza się w warunkach normalnej pracy i polega na rejestracji minimum 7 a maksymalnie 14 parametrów opisujących sygnał AT, takich jak:

1. Czas trwania sygnału EA (ang. *duration*),
2. Czas narastania sygnału EA (ang. *rise time*),
3. Czas wytlumienia sygnału EA (ang. *decay time*),
4. Średnie napięcie skuteczne (ang. *RMS*),
5. Liczba zliczeń (ang. *counts*),
6. Liczba zliczeń do maksimum amplitudy sygnału (ang. *counts to peak*),
7. Amplituda sygnału EA (ang. *amplitude*),
8. Energia sygnału (ang. *energy*),
9. Średnia częstotliwość EA (ang. *average frequency*),
10. Częstotliwość pogłosu (ang. *reverberation frequency*),
11. Częstotliwość początkowa (ang. *initiation frequency*),
12. Energia bezwzględna sygnału EA (ang. *absolut energy*),
13. Moc sygnału (ang. *signal strength*),

14. Średni poziom sygnału EA (ang. ASL).

5.1. Badania wstępne

Każdy pomiar poprzedzony jest badaniami wstępnymi, które obejmują:

❖ Pomiar tła

Przed rozpoczęciem właściwego pomiaru należy wykonać pomiar tła zapisując emisję akustyczną zarejestrowaną przez wszystkie czujniki. Monitoring ten winien być prowadzony, co najmniej przez 60 minut. W tym czasie obiekt, jeżeli jest to możliwe, należy wyłączyć z ruchu. W przypadku wystąpienia nisko amplitudowej emisji o dużej intensywności lub sygnałów o dużej energii i amplitudzie (>60 dB) należy sprawdzić czy emisja nie jest generowana przez sygnały z zewnątrz. Jeśli sygnały emisji akustycznej pochodzą z zewnątrz to przed przystąpieniem do właściwego monitoringu ich źródła usunąć lub sygnały te odfiltrować.

❖ Pomiar tłumienia

Pomiar tłumienia w elementach liniowych (poprzecznicze, podłużnicze) należy przeprowadzić wzdłuż ich osi. W tym celu należy założyć czujnik emisji akustycznej w odległości ~0,2 m od końca elementu a następnie idąc wzdłuż osi co 1,0 m wzbudzać sygnał AT korzystając ze źródła wzorcowego z równoczesną rejestracją amplitudy sygnałów. Dla każdego miejsca generowania sygnałów wyznacza się wartość średnią amplitudy z trzech pomiarów. Wykres zmian amplitudy sygnałów akustycznych w funkcji odległości źródła od czujnika AT jest podstawą wyznaczenia współczynnika tłumienia. Informacje wynikające ze zmian w tłumieniu należy uwzględnić przy sprawdzeniu poprawności rozmieszczenia czujników.

Można zrezygnować z pomiaru tłumienia, ale wówczas maksymalna odległość pomiędzy czujnikami nie może być większa niż 2,0 m.

❖ Pomiar prędkości propagacji sygnałów AT.

Podobnie jak pomiar tłumienia pomiar prędkości należy przeprowadzić na odcinkach o długości 2,0 m. W tym celu można wykorzystać wyniki zarejestrowane podczas pomiaru tłumienia. W poprzecznicach i podłużnicach prędkość wyznacza się wzdłuż osi, natomiast dla płyt i węzłów należy wyznaczyć prędkość propagacji na kierunkach: wzdłużnym poprzecznym i pod kątem 45 stopni. Niższa prędkości propagacji w strefach wskazuje na uszkodzenia w stali. Zmiany w tłumieniu oraz w prędkości propagacji fal należy ująć w raporcie i uwzględnić w ocenie rozległości oraz stopnia uszkodzenia konstrukcji.

5.2. Badania zasadnicze

Badania zasadnicze obiektów i elementów konstrukcyjnych (belki, dźwigary dachowe, mosty, wiadukty) metodą emisji akustycznej (monitoring) prowadzi się na obiektach obciążonych podczas normalnej eksploatacji obiektu (w wyjątkowych sytuacjach obciążeniem próbnym).

❖ Monitoring podczas normalnej eksploatacji obiektu

Badania podczas normalnej eksploatacji obiektu mają na celu:

- stwierdzenie czy w analizowanym obiekcie są uszkodzenia czynne, to znaczy uszkodzenia, które się powiększają w warunkach eksploatacji,
- identyfikację i lokalizację uszkodzeń niewidocznych podczas przeglądu obiektu,
- oszacowanie stopnia zagrożenia, jakie uszkodzenia stanowią dla obiektu,
- stwierdzenie, w jakim stopniu w warunkach normalnej eksploatacji zagrożone jest bezpieczeństwo obiektu.

Badania podczas normalnej eksploatacji są najczęściej przeprowadzanym pomiarem. Aby pomiar był reprezentatywny zalecany jest ciągły monitoring w dniu tygodnia, który charakteryzuje się największym nasileniem ruchu. W przypadku monitoringu należy rejestrować przejazdy pojazdów o dużej masie podając godzinę przejazdu, orientacyjną prędkość i przybliżoną masę pojazdu (określając wielkość samochodu). Alternatywą jest monitoring z pomiarem bieżącej wartości średniej obciążenia (wyrażonego poprzez pomiar naprężenia lub ugięcia w wybranym miejscu obiektu).

Za minimalny czas monitoringu należy przyjąć trzy pomiary po 1 godzinie (dwa w godzinach szczytu + jeden poza szczytem). W przypadku, kiedy natężenie ruchu jest niskie należy wydłużyć czas jednostkowego pomiaru do 2 godzin wybierając okres największego nasilenia dobowego ruchu bądź obciążenie pojazdem o masie dopuszczalnej dla nośności obiektu.

5.3. Badania uzupełniające

❖ Monitoring obiektów nowych

Pomiar ma za zadanie potwierdzenie poprawności wykonania obiektu oraz określenie poziomu odniesienia, tzw. metryki akustycznej, będącej podstawą w ocenie rozwoju uszkodzeń w czasie eksploatacji obiektu. Wyniki pomiaru są archiwizowane i porównywane z wynikami kolejnych badań prowadzonych w odstępach 5-letnich, względnie po wydarzeniach, podczas których obiekt mógł zostać uszkodzony. Pomiar właściwy należy poprzedzić określeniem tła oraz tłumienia i prędkości propagacji sygnałów akustycznych. Czujniki należy rozmieścić podobnie jak podczas monitorowania obiektu w czasie normalnej eksploatacji.

Badania zazwyczaj prowadzi się pod obciążeniem przyjętym w projekcie obciążeń próbnych. Należy zwrócić uwagę, aby wartość obciążenia była taka sama podczas wszystkich badań okresowych. W przypadku mostów obciążenie stanowią pojazdy poruszające się z minimalną prędkością wzdłuż

obiektu. Ocenę przeprowadza się na podstawie przejazdów (ilość przejazdów określa osoba prowadząca pomiar, nie mniej jednak niż 10). Wyniki zarejestrowane podczas pierwszych dwu przejazdów przez nowy obiekt mogą zostać odrzucone (podczas tych przejazdów może wystąpić podwyższona emisja spowodowana wzajemnym dopasowaniem elementów konstrukcji, w czasie którego ma miejsce tarcie. Kolejny monitoring należy przeprowadzić na obiekcie obciążonym obciążeniem quasistatycznym, równym obciążeniu dopuszczalnemu, w okresie minimum 30 minut. Kryteria oceny stosuje się podobnie jak w mostach eksploatowanych z zastrzeżeniem, iż wszystkie oceniane parametry winny mieścić się w kategorii „brak uszkodzeń” względnie „uszkodzenia nieistotne”.

❖ **Monitoring pod przejezdny obciążeniem ponadnormatywnym**

Pomiar podczas przejazdu ładunków ponadnormatywnych – ma na celu zapewnienie bezpieczeństwa przeprawy oraz stwierdzenie czy w czasie przejazdu nie pojawiły się uszkodzenia zagrażające obiektowi.

Pomiar właściwy należy poprzedzić pomiarem tła oraz monitoringiem emisji akustycznej w czasie 2 godzin podczas normalnego ruchu pojazdów przed i po wzmocnieniu konstrukcji (jeśli takie jest przewidziane). Pomiar emisji akustycznej podczas przejazdu ładunku należy obserwować w sposób ciągły a w razie wystąpienia silnej emisji poinformować o tym fakcie osobę odpowiedzialną za przejazd ładunku ze wskazaniem miejsca wystąpienia emisji oraz przypuszczalnego jej źródła. Jeśli ładunek przewożony jest na wózkach, które kolejno najeżdżają na przęsło, to należy zwrócić uwagę na różnice w intensywności emisji przy najeździe kolejnych wózków. Jeśli przy najazdach kolejnych wózków emisja wzrasta może to świadczyć o uszkodzeniu przęsła podczas ich przejazdu. Po zakończeniu przeprawy należy przeprowadzić ponowny monitoring obiektu w ciągu 2 godzin wybierając okres o podobnym natężeniu ruchu jak podczas monitoringu wstępnego.

6. KRYTERIA OCENY USZKODZEŃ KONSTRUKCJI SPRĘŻONYCH ORAZ CIĄGNOWYCH DROGOWYCH OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH

Badaniu poddaje się wszystkie lub wybrane elementy nośne konstrukcji. Ocena stopnia uszkodzenia obiektu przeprowadzona jest na podstawie analizy parametrów sygnałów emisji akustycznej zarejestrowanej podczas obciążania obiektu inżynierskiego. Uszkodzenia generujące sygnały akustyczne wykrywane są metodą lokalizacji strefowej lub powierzchniowej. W przypadku, kiedy strefa obejmuje obszar przypodporowy i istnieje obawa, że część sygnałów jest wynikiem tarcia pomiędzy podporą a konstrukcją to dodatkowo w tej strefie należy zastosować lokalizację powierzchniową z czujnikami „strzegącymi” odcinającymi sygnały pochodzące z zewnątrz (miejsc styku podpory z badanym elementem). Ocenie podlega każda strefa a następnie, na podstawie określonego dla każdej strefy stopnia uszkodzenia wyznaczonego na podstawie porównania z sygnałami wzorcowymi ocenie podlega cały element.

6.1. Kryteria oceny stanu technicznego konstrukcji lub ich elementów

Ocena polega na analizie zmian w intensywności emisji akustycznej generowanej w poszczególnych strefach określonych elementów konstrukcji. Rejestrowane sygnały AT grupujemy w klasy, którym przyporządkowane są różne mechanizmy destrukcyjne, jakie mają miejsce w czasie użytkowania analizowanych obiektów budowlanych. Ilość rejestrowanych parametrów sygnałów AT musi być zgodna z parametrami użytymi do budowy bazy sygnałów wzorcowych.

Grupowanie i klasyfikowanie sygnałów AT należy przeprowadzić metodą rozpoznawania obrazów.

Stopień zagrożenia, jakie stwarzają procesy generujące w obrębie jednej klasy są określane poprzez tak zwany kod intensywności procesów destrukcyjnych. Procesy te najlepiej obrazują wykresy punktowe, gdzie każdemu sygnałowi AT przypisany jest jeden punkt. Kolor i kształt punktu wskazują na klasę, do której przynależy dany sygnał AT. Omawiane klasy, symbole i kody prezentuje tabela P.6.1.1 i P.6.1.2 dla obiektów sprężonych i ciągnowych oraz P.6.1.3 gdzie podano ogólny opis wpływu defektów na stan techniczny konstrukcji.

Tabela P.6.1.1 Klasy, symbole i kody sygnałów AT

<u>Kolor</u>								
<u>Nr klasy</u>	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4	Nr 5	Nr 6	Nr 7	Nr 8
<u>Kod zagrożenia</u>	5	4	3	3	2	2	1	0

Gdzie:

Nr 1. Mikropęknięcia w betonie na granicy frakcji kruszywa o wymiarach 0-2 mm,

Nr 2. Mikropęknięcia w betonie na granicy frakcji kruszywa wymiarach 2-8 mm,

Nr 3. Powstanie i propagacja rysy w strefie rozciąganej betonu,

Nr 4. Rozwój rysy oraz tarcie na granicy frakcji kruszywa o wymiarach powyżej 8 mm,

Nr 5. Uplastycznienie stali, korozja stali

Nr 6. Pękanie na granicy beton – zbrojenie,

Nr 7. Odspojenie się zbrojenia od betonu,

Nr 8. Zerwanie splotów sprężających.

Kodowanie rozległości uszkodzeń i wrażliwości konstrukcji należy przeprowadzić zgodnie z wytycznymi zawartymi w tabelach podanych poniżej a następnie zestawić z innymi ocenami wszystkich elementów przeprowadzonych metodami tradycyjnymi.

Tabela P.6.1.1**Przyjęte kodowanie rozległości uszkodzeń**

Kod	Opis
A	Brak znaczących wad
B	Mała ilość wad, odejmujące nie więcej niż 5% powierzchni / długości bądź ilości elementów
C	Umiarkowana ilość wad, odejmujące od 5% do 20% powierzchni / długości bądź ilości elementów
D	Duża ilość wad, odejmujące od 20% do 50% powierzchni / długości bądź ilości elementów
E	Rozległe wady, odejmujące od 50% do 70% powierzchni / długości bądź ilości elementów
F	Rozległe uszkodzenia, obejmujące więcej niż 70% powierzchni / długości bądź ilości elementów

W ocenie rozległości uszkodzenia wykorzystujemy wyniki lokalizacji strefowej oraz klasyfikację sygnałów w strefach.

Tabela P.6.1.2**Ogólny opis wpływu defektów na stan techniczny konstrukcji**

Kod	Opis	Nr klasy
0	Element niespełniający swojej funkcji użytkowej bądź zniszczony	Nr 8
1	poważna wada / uszkodzenie i / albo element jest blisko awarii / zniszczenia.	Nr 7
2	Umiarkowana wada / uszkodzenie, która może mieć wpływ na utratę nośności	Nr 5, Nr 6
3	Pierwsze oznaki pogorszenia stanu technicznego konstrukcji, pojawiają się niewielkie wady / uszkodzenia, niewpływające na nośność elementu.	Nr 3, Nr 4
4	Nowy element bądź element z wadą niemającą wpływu na jego nośność	Nr 2
5	Nowy element bez wad	Nr 1

Zastosowane metody IADP-bis pozwala na oszacowanie szerokości rozwarcia rys oraz monitorowanie w czasie ich rozwoju w konstrukcjach sprężonych i ciągnowych.

Tabela P.6.1.3.

**Szacowanie szerokości rys przy uwzględnieniu kryterium oceny kodów zagrożenia oraz
nr klasy sygnałów AT**

Proponowane badania z użyciem poniższego kryterium-metoda IADP-bis

Kod	Opis	Nr klasy	Szerokość rysy [mm]
0	Element niespełniający swojej funkcji użytkowej bądź zniszczony	Nr 8 Nr 7	> 1,0
1	Poważna wada / uszkodzenie i / albo element jest blisko awarii / zniszczenia.	Nr 6 Nr 5	0,6 – 1,0
2	Umiarkowana wada / uszkodzenie, która może mieć wpływ na obniżenie nośności	Nr 4	0,2 – 0,6
3	Pierwsze oznaki pogorszenia stanu technicznego konstrukcji, pojawiają się niewielkie wady / uszkodzenia, niewpływające na obniżenie nośności elementu.	Nr 3	0,1- 0,2
4	Nowy element bądź element z wadą niemającą wpływu obniżenie nośności	Nr 2	0 – 0,1
5	Nowy element bez wad – spełniający warunek SLS	Nr 1	0

7. SPRAWOZDANIE Z BADAŃ METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ STANU TECHNICZNEGO KONSTRUKCJI STALOWYCH

Sprawozdanie powinno zawierać:

7.1. Podstawę badań:

- Zleceniodawca,
- Cel badań,
- Zakres badań.

7.2. Opis obiektu:

- Usytuowanie obiektu (numer drogi, kilometr, itp.),
- Rysunek obiektu,
- Opis konstrukcji – typ dźwigarów, posadowienie, podpory, itp
- Obliczenia statyczne,
- Opis natężenia ruchu,
- Opis uszkodzeń zgodnie z procedurami GDDKiA lub rozporządzeniem ministra infrastruktury.

7.3. Opis miejsca badań:

- Warunki atmosferyczne,
- Data i czas badań,

7.4. Aparatura:

- Charakterystyka procesora, rodzaj i typ czujników,
- Nastawy aparatury,
- Plan rozmieszczenia czujników na konstrukcji, numery czujników i przedwzmacniaczy,
- Wyniki cechowania czujników (podać wartości amplitud źródła wzorcowego dla każdego czujnika, co najmniej po trzy pomiary dla każdego czujnika),
- Wyniki pomiarów tła,
- Wartość napięcia progowego,
- Wyniki pomiarów tłumienia sygnałów AT,
- Wyniki pomiarów prędkości propagacji sygnałów AT,
- Rodzaj lokalizacji i podział na strefy.

7.5. Obciążenie:

- Określenie czasu monitoringu pod ruchem ciągłym,
- Opis natężenia ruchu i pojazdów,
- Opis obciążenia próbnego (wielkość pojazdów, masa, ustawienie pojazdów na jezdni, sposób i prędkość poruszania, kierunek najazdów itp.),
- Opis obciążenia stacjonarnego.

7.6. Uwagi dotyczące przebiegu rejestracji sygnałów emisji akustycznej:

7.7. Dokumentacja pomiaru:

- Określenie czasu monitoringu,
- Wykresy rejestrowanych sygnałów AT,
- Informacje o przebiegu pomiaru.

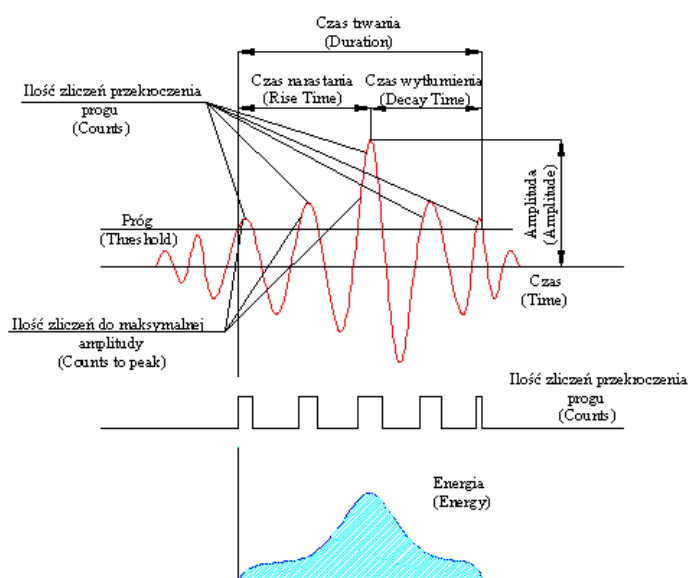
7.8. Analiza wyników:

7.9. Ocena stanu technicznego badanej konstrukcji wraz z uzasadnieniem

8. STOSOWANA TERMINOLOGIA

Poniżej przedstawiono definicje i interpretację słowną używanych w niniejszym opracowaniu pojęć i terminów związanych z emisją akustyczną. Znajomość tej terminologii jest niezbędna dla zrozumienia stosowanej metody oraz prawidłowego posługiwania się aparaturą pomiarową.

- A.1. Emisja akustyczna – definiowana jest, jako proces generowania fal sprężystych na skutek defektów powstałych w obciążanym materiale.
- A.2. Kanał emisji akustycznej – jest to zestaw złożony z czujnika AT, przedwzmacniacza, wzmacniacza, filtrów sprzętowych i programowych, procesora AT oraz przewodów łączących. Podczas badania metodą AT elementów lub obiektów wielkogabarytowych stosuje się od kilku do kilkudziesięciu kanałów AT.
- A.3. Czujnik emisji akustycznej – piezoelektryczny przetwornik sygnału AT (fali sprężystej) na sygnał elektryczny. Czujniki emisji akustycznej dzielą się na:
- Czujniki szerokopasmowe charakteryzujące się stałą czułością w określonym przedziale częstotliwości
 - Czujniki rezonansowe, w których czułość zależy od częstotliwości sygnału
- A.4. Strefa pomiarowa – wyodrębniony fragment badanego elementu, którego największy wymiar liniowy wynosi od kilku do kilkuset cm (w zależności od zastosowanych czujników AT i tłumienia w materiale). Sygnały generowane w strefie pomiarowej rejestrowane są przez ściśle określony czujnik.
- A.5. Zdarzenie AT (*ang. AT event*) – lokalna zmiana stanu materiału generująca sygnał AT.



Rys.1. Schemat typowego sygnału emisji akustycznej.

- A.6. Amplituda sygnału AT (*ang. amplitude*) – maksymalne (podawane w μV lub dB) napięcie mierzone na wyjściu czujnika w obrębie jednego sygnału emisji akustycznej. Amplituda wyrażona w dB obliczana jest ze wzoru:

$$A_{dB} = 20 \log \frac{V_{AE}}{V_0} - (A_{wzm}) \quad [dB] \quad (1)$$

gdzie: V_{AE} - maksymalne napięcie sygnału AT w voltach, V_0 - napięcie odniesienia równe $1\mu\text{V}$, A_{wzm} – wzmacnienie na przedwzmacniaczu podane w decybelach

- A.7. Wartość progowa sygnału AT (*ang. threshold*) – ustawiany programowo (w dB) poziom napięcia sygnału – w analizie jest uwzględniana część sygnału powyżej wartości progowej.
- A.8. Czas trwania sygnału AT (*ang. duration*) – czas (podawany w μs), w którym amplituda sygnału przekracza wartość progową.
- A.9. Czas narastania sygnału AT (*ang. rise time*) – czas (podawany w μs), pomiędzy wartością początkową sygnału AT przekraczającą wartość progową a maksymalną wartością amplitudy.
- A.10. Liczba zliczeń (*ang. counts*) – liczba wskazująca ile razy sygnał emisji akustycznej przekroczył wartość napięcia progowego
- A.11. Liczba zliczeń do wartości maksymalnej amplitudy (*ang. counts to pATk*) – liczba wskazująca ile razy sygnał emisji akustycznej przekroczył wartość napięcia progowego do chwili uzyskania maksymalnej wartości amplitudy
- A.12. Energia sygnału (*ang. energy*) – obszar ograniczony obwiednią wyznaczoną z wartości ekstremalnych sygnału AT mierzony w jednostkach ($1\mu\text{Vs/zliczenie}$). Często, jako zamiennik energii sygnału używana jest moc sygnału (*ang. signal strength*). Wartości tych parametrów jak i metody ich obliczania są podobne, można je, zatem stosować wymiennie zachowując odpowiednią dokładność.
- A.13. Średnie napięcie skuteczne (*ang. RMS*) – jest to wartość napięcia, które spowoduje wydzielanie się na nim energii odpowiadającej średniej mocy tego napięcia mierzonego w skali liniowej i podawanego w voltach
- A.14. Średni poziom sygnału AT (*ang. ASL*) – jest miarą ilości zmian średniej wartości amplitudy podawanej w decybelach [dB]
- A.15. Średnia częstotliwość sygnału AT (*ang. average frequency*) – jest określana dla całego pojedynczego sygnału AT. Wielkość ta jest ilorazem liczby zliczeń i czasu trwania sygnału AT.

$$FA = \frac{\text{liczba zliczeń AT}}{\text{czas trwania sygnału AT}} \quad [\text{kHz}] \quad (2)$$

- A.16. Częstotliwość pogłosu sygnału AT (*ang. reverberation frequency*) – jest określana dla tej części pojedynczego sygnału AT, która powstaje po osiągnięciu przez sygnał wartości maksymalnej. Wielkość ta jest opisana zależnością przedstawioną poniżej.

$$FR = \frac{(\text{liczba zliczeń AT} - \text{liczba zliczeń do wartości maksymalnej amplitudy})}{(\text{czas trwania sygnału AT} - \text{czas narastania sygnału AT})} [\text{kHz}] \quad (3)$$

- A.17. Częstotliwość początkowa sygnału AT (*ang. initiation frequency*) – jest określana dla tej części pojedynczego sygnału AT, która powstaje przed osiągnięciem przez sygnał wartości maksymalnej. Wielkość ta jest opisana zależnością przedstawioną poniżej.

$$FI = \frac{(\text{liczba zliczeń do wartości maksymalnej amplitudy})}{(\text{czas narastania sygnału AT})} [\text{kHz}] \quad (4)$$

- A.18. Moc sygnału (*ang. signal strength*) – obszar ograniczony obwiednią całego sygnału AT mierzony w jednostkach (1pVs/zliczenie). Wielkość ta definiowana jest poniższym wzorem:

$$S_O = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} f_+(t) dt + \frac{1}{2} \left| \int_{t_1}^{t_2} f_-(t) dt \right| \quad (5)$$

gdzie: f_+ - funkcja opisująca obwiednię „dodatniej” części sygnału, f_- - funkcja opisująca obwiednię „ujemnej” części sygnału, t_1 - czas, w którym obwiednia sygnału przekracza wyznaczony próg, t_2 - czas, w którym obwiednia sygnału schodzi poniżej wyznaczonego progu.

- A.19. Energia bezwzględna sygnału AT (*ang. absolut energy*) – rzeczywista energia mierzona podczas procesu generującego sygnał AT podawana w jednostkach aJ (10^{-18}J).

- A.20. Efekt Felicity – występuje w przypadkach obciążenia powtarzalnego o narastających w sposób kontrolowany wartościach, gdy podczas kolejnego obciążenia emisja akustyczna ma miejsce przy niższej wartości obciążenia niż maksymalne obciążenie w cyklu poprzednim.

- A.21. Współczynnik Felicity - CBI (*ang. concrete beam integrity*) – jest to stosunek obciążenia w cyklu wtórnym, przy którym rozpoczyna się emisja akustyczna do maksymalnego obciążenia w cyklu poprzednim.

- A.22. Efekt Kaisera – polega na braku powtarzalności działania emisji akustycznej przy wartości naprężenia mniejszej od maksymalnej wartości uprzednio przyłożonego („zapamiętanego”) naprężenia.

- A.23. Lokalizacja źródeł sygnałów AT – oznacza lokalizację źródeł sygnałów AT w badanych elementach konstrukcji. Polega na określeniu współrzędnych miejsca, z którego pochodzą rejestrowane sygnały. Obliczenia wykonywane są przez program obsługujący procesor AT

na podstawie pomiaru prędkości propagacji fal oraz różnic w czasie dotarcia sygnału od źródła do poszczególnych czujników AT. Rozróżnia się następujące sposoby lokalizacji:

- a) liniowy,
- b) powierzchniowy,
- c) objętościowy,
- d) strefowy.

W lokalizacji strefowej sygnały rejestrowane przez każdy z czujników pochodzą ze ściśle określonej objętości badanego obiektu.

A.24. Wskaźnik historii rozwoju uszkodzeń (WHRU – H(t)) (*ang. historic index*) – jest to miara zmienności mocy (energii) sygnału AT w czasie badań.

Parametr ten jest miarą zmian mocy sygnału w czasie badania. H(t) mierzony jest w czasie rzeczywistym podczas prowadzenia pomiaru. Porównuje on średnią wartość mocy ostatnich 20% zarejestrowanych zdarzeń lub ostatnich 200 zdarzeń, przy czym pod uwagę bierze się mniejszą wartość.

A25. Współczynnik zagrożenia S_r (*ang. severity*) - jest to wartość średnia 50 (lub 20) sygnałów o największej mocy zarejestrowanych podczas badania. Wartość ta określona jest poniższym wzorem:

$$S_r = \frac{H_f}{J} \sum_{m=1}^{m=J} S_{Om} \quad (6)$$

gdzie: H_f – współczynnik określany w zależności od rodzaju badanej konstrukcji [14], S_{Om} - moc pojedynczego sygnału, J - ilość sygnałów, z której wyznacza się współczynnik zagrożenia

Parametr ten może być wyznaczony, jeśli zarejestrowano, co najmniej 50 zdarzeń akustycznych. Współczynnik zagrożenia podczas badań może tylko wzrastać. Nagły wzrost wartości S_r sygnalizuje pojawienie się istotnych uszkodzeń.

A.26. Intensywność (*ang. intensity*) – dwuparametrowa funkcja (zależna od wskaźnika historii rozwoju uszkodzeń i współczynnika zagrożenia) pozwalająca sklasyfikować zidentyfikowane metodą AT uszkodzenia pod względem zagrożenia, jakie niosą one dla konstrukcji. Wartości S_r funkcji H(t) nanosi się na wykresy (w skali pół-logarytmicznej) dla każdej strefy, na jaką podzielono elementy konstrukcji; na wykresach intensywności zaznaczone są obszary odpowiadające różnym stopniom zagrożenia, jakie zostały spowodowane przez uszkodzenia.

A.27. Filtracja sygnałów – polega na odrzuceniu sygnałów AT uznanych przez osoby prowadzące pomiar za nieistotne dla oceny trwałości i nośności badanego obiektu (np. sygnały o energii zerowej generowane automatycznie przez program).

- A.28. Pomiar tła – polega na rejestrowaniu sygnałów AT generowanych przez procesy reologiczne oraz otoczenie wokół badanego obiektu.
- A.29. Czas uderzenia - czas, odczytany na zegarze procesora, w którym czujnik zarejestrował sygnał AE.
- A.30. Uderzenie (*ang. hit*) – sygnał zarejestrowany przez dowolny czujnik współpracujący z procesorem.
- A.31. Czas martwy (*ang. rear time*) - czas liczony od zakończenia ostatniego sygnału, w czasie, którego aparatura nie rejestruje sygnałów
- A.32. Transformacja Fouriera - transformacja Fouriera umożliwia nam przedstawienie sygnału zmiennego w czasie w skali częstotliwości. Każdy sygnał analogowy można przedstawić w postaci składowych sinusoidalnych o odpowiedniej amplitudzie, fazie i częstotliwości.
- A.33. Szybka transformata Fouriera (FFT) – to algorytm liczenia dyskretnej transformaty Fouriera
- A.34. Dyskretna transformata Fouriera (DFT) – jest transformatą Fouriera wyznaczoną dla sygnału próbkowanego
- A.35. Próbkowanie – dyskretyzacja, kwantowanie w czasie to proces stworzenia sygnału impulsowego reprezentującego sygnał ciągły. Zwykle kojarzone jest z jednym z etapów przetwarzania sygnału analogowego na cyfrowy.
- A.36. Analiza falkowa – dekomponuje sygnał na składowe ortogonalne, będące przesunięciami i przeskalowanymi wersjami tzw. falki podstawowej (np. falka Haara).
- A.37. Funkcja Green'a – jest to funkcja, stanowiąca jądro operatora całkowego, będącego odwrotnym do operatora różniczkowego w zwyczajnym bądź cząstkowym równaniu różniczkowym wraz z warunkami początkowymi lub brzegowymi.
- A.38. Grupowanie i klasyfikacja - związane są z podziałem zbioru elementów badanych na podzbiory zwane grupami, klasami bądź klastrami. Cechą tych podzbiorów jest to, że elementy w tym samym podzbiorze są do siebie podobne natomiast elementy w różnych podzbiorach są niepodobne.
- A.39. Grupowanie iteracyjne – polega na iteracyjnym poszukiwaniu zbioru elementów wzorcowych reprezentujących poszczególne klasy. W każdej iteracji poszukuje się kolejnych przybliżeń wzorców. W zależności od przyjętych założeń elementem wzorcowym może być jeden z elementów populacji X lub należeć do pewnego uniwersum $U \supseteq X$. W przestrzeniach metrycznych element wzorcowy jest obliczany, jako średnia arytmetyczna i reprezentuje on odpowiednio środek ciężkości klasy. Algorytmy bazujące na tym typie grupowania to, np. k-środków (*ang. k-means*).

- A.40. Grupowanie najbliższego sąsiada – polega na określeniu funkcji odległości lub funkcji podobieństwa pomiędzy poszczególnymi składnikami grupy. Do wad tej metody należy bardzo duża zależność otrzymywanych wyników od kolejności ułożenia grupowanych obiektów. Rozrzut i przypadkowość otrzymywanych wyników jest tak duża (w stosunku do innych algorytmów), że wyklucza to stosowanie tego algorytmu w większości zastosowań. Przykładem algorytmu bazującego na tym typie grupowania jest algorytm najbliższego sąsiada (*ang. Nearest-neighbourhood-type*).
- A.41. Grupowanie rozmyte – jest pomocne w przypadku, gdy nie istnieje wyraźna, ostra granica rozdzielająca naturalne grupy obiektów. W rzeczywistym świecie często obserwowane jest zjawisko wielokrotnego bądź częściowego należenia danego obiektu do grupy. Można wyróżnić dwa rodzaje grupowania rozmytego: pierwsze korzysta z rozmytych relacji do dokonania grupowania; drugi rodzaj oparty jest o funkcję kryterium, na podstawie, której tworzy się rozmyte grupy. Przykładowe algorytmy wykorzystujące ten typ grupowania to np.: algorytm FCM (*ang. Fuzzy C – Means*), algorytm FERIS (*ang. Fuzzy Equivalence Relation - based Image Segmentation*).
- A.42. Hierarchiczne grupowanie aglomeracyjne – w metodzie tej grupy budowane są poprzez łączenie istniejących klas, bazując na ich odległości. Wykonanie kolejnego cyklu grupowania skutkuje redukcją klastrow o jeden. Jeżeli dwa obiekty x_1 i x_2 należą do tej samej klasy w kolejnym cyklu k , to również będą przynależą do tej samej grupy w następnym cyklu pracy algorytmu. Podziały otrzymywane w wyniku pracy tego algorytmu tworzą rozłączne podziały, żadna para klastrow istniejących na danym etapie obliczeń nie ma ze sobą części wspólnej. Przykładowymi algorytmami wykorzystującymi ten typ grupowania są np. algorytm BIRCH (*ang. Balanced Iterative Reduction and Clustering Using Hierarchies*), algorytm CURE (*ang. Clustering Using REpresentatives*).
- A.43. Analiza falowa (harmoniczna) – przedstawia ona sygnał przy użyciu funkcji sinusoidalnych. Ta metoda jest użyteczna przede wszystkim do analizy częstotliwościowej szeregów czasowych stacjonarnych.
- A.44. Sygnał – to abstrakcyjny model dowolnej mierzalnej wielkości zmieniającej się w czasie, generowanej przez zjawiska fizyczne lub systemy. Tak jak wszystkie zjawiska może być opisany za pomocą aparatu matematycznego, np. poprzez podanie pewnej funkcji zależnej od czasu. Ponieważ sygnał niesie informację o naturze badanych zjawisk lub systemów, w niektórych dziedzinach nauk jest on traktowany jak nośnik informacji. Sygnał oznacza, zatem przepływ strumienia informacji, przy czym przepływ może odbywać się w jednym lub w wielu wymiarach.