

# METODY PRZETWARZANIA SYGNAŁÓW WIBROAKUSTYCZNYCH w dziedzinie czasu

Zjawiska wibroakustyczne występujące podczas pracy urządzeń często wykorzystywane są jako źródło informacji o ich stanie technicznym. Z tego względu, przez monitorowanie poziomu drgań lub pomiary akustyczne, możliwe jest przewidywanie i zapobieganie awariom, które wywoła np. nadmierne zużycie albo rozwijające się uszkodzenie. Jest to zadanie trudne, gdyż wymaga zazwyczaj dobrej znajomości zjawisk zachodzących w badanym urządzeniu.

**dr hab. inż. Grzegorz Peruń, prof. PŚI**

Katedra Transportu Drogowego, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, Politechnika Śląska

**W** ramach artykułu przedstawiona zostanie krótka klasyfikacja sygnałów wibroakustycznych oraz analizy tych sygnałów w dziedzinie czasu. Zebrane wiadomości mogą być przydatne zwłaszcza dla osób, które dopiero zaczynają interesować się diagnostyką wibroakustyczną czy też samym przetwarzaniem sygnałów. Z tego względu poczyniono też pewne uproszczenia teoretyczne, pomijając szczegóły aparatu matematycznego. Pozyskane w czasie pomiarów sygnały wibroakustyczne wymagają, celem uzyskania pożądanej informacji o stanie technicznym, zastosowania różnych metod analiz. Nie ma jednego zawsze skutecznego algorytmu postępowania, podobnie jak nie ma jednego uniwersalnego miejsca dokonywania pomiarów, niezależnego od konstrukcji i sposobu działania badanego obiektu. Prowadząc analizy, poszukuje się pewnych miar sygnałów, dostatecznie dobrze skorelowanych z badanym zjawiskiem. W zależności od sytuacji stosowana może być różna liczba metod analizy. W prostych przypadkach diagnostycznych może okazać się, że wystarczy wyznaczenie jednej miary, której zmiany odzwierciedlają nasilenie badanego zjawiska. Zwykle jednak konieczne jest wyznaczenie wielu różnych miar i poszukiwanie

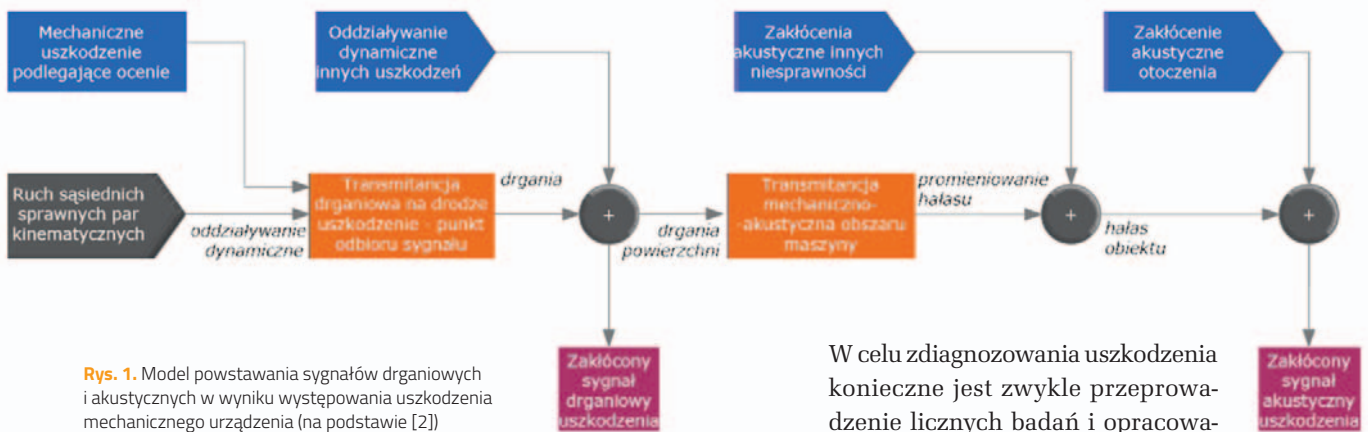
związków pomiędzy ich wartościami a zmianą stanu urządzenia.

## Podstawowe rodzaje sygnałów wibroakustycznych

Istnieje wiele sposobów klasyfikacji sygnałów. Najogólniej sygnały dzieli się na zdeterminowane oraz niezdedeterminowane, nazywane częściej stochastycznymi, losowymi czy też przypadkowymi. Pierwsze z nich pozwalają na określenie swojej dokładnej wartości w każdej chwili czasowej, gdyż można opisać je z użyciem funkcji matematycznych. Sygnały zdeterminowane można dalej sklasyfikować jako:

- okresowe,
- prawie okresowe,
- zmodulowane,
- impulsowe o ograniczonej energii.

W przypadku sygnałów losowych nie istnieje opis za pomocą zależności matematycznych. Efektem tego jest brak możliwości wyznaczenia ich dokładnej wartości w dowolnej, przyszłej chwili czasu. W tym przypadku da się jednak określić prawdopodobieństwo, z jakim sygnał przyjmie konkretną wartość w określonej chwili. W praktyce w znakomitej większości ma się do czynienia z sygnałami losowymi. Dalszy podział tej grupy wyróżnia: ►



Rys. 1. Model powstawania sygnałów drganiowych i akustycznych w wyniku występowania uszkodzenia mechanicznego urządzenia (na podstawie [2])

- ▶ · sygnały stochastyczne stacjonarne,
- sygnały stochastyczne niestacjonarne.

Sygnały stacjonarne to w prostych słowach takie sygnały, których kolejne realizacje czasowe charakteryzują się tymi samymi wartościami parametrów statystycznych, np. wartością średnią i wariancją. Z kolei sygnały, których kolejne realizacje czasowe nie charakteryzują się tymi samymi wartościami parametrów statystycznych, nazywa się sygnałami stochastycznymi niestacjonarnymi. Ponadto, gdy dowolna realizacja czasowa analizowanego procesu ma te same parametry statystyczne, co zbiór jego realizacji, sygnał stacjonarny nazywa się ergodycznym. Dobór metod analizy w dużym stopniu jest związany z rodzajem mierzonego sygnału, a same metody wykorzystywane do prowadzenia analiz w obu podstawowych grupach różnią się istotnie.

### Przetwarzanie sygnałów wibroakustycznych

Sygnały drganiowe rejestrowane są z użyciem np. przetworników przyspieszeń bądź wibrometrów, natomiast sygnały akustyczne z użyciem mikrofonów. W literaturze często spotyka się pogląd, że bardziej użytecznym sygnałem jest sygnał drganiowy. Uzasadnia się to brakiem możliwości pełnego odizolowania sygnału akustycznego od innych sygnałów, które nie są wywołane przez pracę badanego urządzenia [1], co jest dość częstym zjawiskiem. Przetwarzanie sygnałów pod kątem określenia stanu technicznego maszyny nie jest zadaniem łatwym w przypadku każdego nieco bardziej rozbudowanego obiektu. Różne uszkodzenia mogą powodować odmienne zmiany w przebiegu sygnału czasowego. Model powstawania sygnałów drganiowych i akustycznych w wyniku występowania uszkodzenia mechanicznego, opracowany na podstawie [2] przedstawiono na rys. 1.

W celu zdiagnozowania uszkodzenia konieczne jest zwykle przeprowadzenie licznych badań i opracowanie wrażliwych miar pozwalających wykrywać nieprawidłowości w pracy urządzenia we wczesnych fazach ich rozwoju, a więc na długo przed wystąpieniem awarii. Liczba możliwych kombinacji uszkodzeń, ich losowy charakter oraz możliwe maskowanie uszkodzenia przez inne czynniki nie zawsze jednak pozwalają opracować algorytm, który umożliwi bezbłędną diagnozę. W konsekwencji, na skutek otrzymanych niejednoznacznych wyników, dochodzić może do niepotrzebnych zatrzymań maszyny wywołanych fałszywym alarmem czy też do sytuacji odmiennej – niewykrycia na czas ewoluującego uszkodzenia. Tworzenie procedur prowadzenia badań pozwalających unikać awarii ma ogromne znaczenie w wielu dziedzinach techniki. Opracowanie wrażliwych i czułych narzędzi pozwalających wykrywać możliwie najwcześniej symptomy nieprawidłowej pracy wywołanych rozwijającym się uszkodzeniem odbywa się przez wykorzystanie licznych osiągnięć z dziedziny analizy sygnałów. Dobierając metodę analizy do postawionego zadania, nie należy zapominać o charakterze sygnału. O ile np. zużycie powierzchni roboczych zębów w przekładni może wywołać stały przyrost wartości skutecznej sygnału, tak do znalezienia symptomu lokalnego uszkodzenia konieczne może okazać się przeprowadzenie co najmniej tej analizy w oknach czasowych. Również zmienność warunków pracy urządzenia może narzucić konieczność stosowania analiz odpowiednich dla sygnałów niestacjonarnych. Poniżej scharakteryzowane zostaną najprostsze metody analizy sygnałów, prowadzone w dziedzinie czasu.

### Analizy sygnałów wibroakustycznych w dziedzinie czasu

Na podstawie zarejestrowanych sygnałów można w dziedzinie czasu wyznaczyć następujące przykładowe miary [3, 5-9, 11]:

- ▷ · wartość średnia  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt \quad (1)$$

gdzie:

$x(t)$  – analizowany sygnał,

$t$  – czas;

- wartość szczytowa  $x_{peak}$ :

$$x_{peak} = \max_{0 < t \leq T} (|x(t)|) \quad (2)$$

- wartość międzyszczytowa  $x_{p-p}$ :

$$x_{p-p} = \left| \max_{0 < t \leq T} (x(t)) - \min_{0 < t \leq T} (x(t)) \right| \quad (3)$$

- wartość średniokwadratowa  $x_e$ :

$$x_e = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt \quad (4)$$

- wartość skuteczna  $x_{RMS}$ :

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt} \quad (5)$$

- wariancja  $v$ :

$$v = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \bar{x}]^2 dt \quad (6)$$

- odchylenie standardowe  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \bar{x}]^2 dt} \quad (7)$$

- skośność  $S$ :

$$S = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \bar{x}]^3 dt}{\left[ \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \bar{x}]^2 dt \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

- kurtoza  $K$ :

$$K = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \bar{x}]^4 dt}{\left[ \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \bar{x}]^2 dt \right]^2} \quad (9)$$

- energia sygnału  $E_x$ :

$$E_x = \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt \quad (10)$$

- moc sygnału  $P_x$ :  $P_x = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt \quad (11)$

Ponadto w diagnostyce różnych obiektów, np. przekładni zębatych, silników spalinowych, łożysk tocznych, obok miar punktowych sygnałów, stosowane są dyskryminanty bezwymiarowe. W wielu przypadkach są to bezwymiarowe cechy sygnałów, które wykazują małą wrażliwość

na zmieniające się warunki pracy badanego urządzenia. Są to m.in. [4, 10]:

- współczynnik szczytu (*crest factor*)  $C$ :

$$C = \frac{x_{peak}}{x_{RMS}} \quad (12)$$

- współczynnik impulsowości (*impulsivity factor*)  $I$ :

$$I = \frac{x_{peak}}{\bar{x}} \quad (13)$$

- współczynnik kształtu (*waveform factor*)  $K$ :

$$K = \frac{x_{RMS}}{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |x(t)| dt} \quad (14)$$

- współczynnik luzu (*clearance factor*)  $L$ :

$$L = \frac{x_{peak}}{\left( \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \sqrt{|x(t)|} dt \right)^2} \quad (15)$$

Metody analiz w dziedzinie częstotliwości, jak również bardziej rozbudowane analizy prowadzone jednocześnie zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości, zostaną przedstawione w kolejnych częściach.  $\square$

#### Piśmiennictwo

1. Batko W., Dąbrowski Z., Kiciński J., Weyna S.: *Nowoczesne metody badania procesów wibroakustycznych*. ITE, Radom 2005.
2. Cempel C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1985.
3. Madej H.: *Diagnosowanie uszkodzeń mechanicznych w silnikach spalinowych maskowanych przez elektroniczne urządzenia sterujące*. ITE, Katowice-Radom 2009.
4. Madej H.: *Minimalizacja aktywności wibroakustycznej korpusów przekładni zębatych*. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Katowice-Radom 2003.
5. Klekot G.: *Zastosowanie miar propagacji energii wibroakustycznej do monitorowania stanu obiektów oraz jako narzędzie w zarządzaniu hałasem*. ITE, Radom 2012.
6. Peruń G.: *Attempt to evaluate the technical condition of the rollers of the belt conveyor by vibration measurements*. „Vibroeng. Procedia”, 2014, vol. 3, s. 296-299.
7. Peruń G., Opasiak T.: *Assessment of technical state of the belt conveyor rollers with use vibroacoustics methods – preliminary studies*. „Diagnostyka”, 2016, vol. 17, no. 1, s. 75-80.
8. Peruń G., Stanik Z.: *Evaluation of state rolling bearings mounted in vehicles with use of vibration signals*. „Arch. Metall. Mater.”, 2015, vol. 60, Iss. 3.
9. Szabatin J.: *Podstawy teorii sygnałów*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
10. Zawisza M.: *Symptomy wibroakustyczne jako uzupełnienie systemu OBD silników wysokoprężnych*. ITE, Warszawa-Radom 2015.
11. Zieliński T. P.: *Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. Wydział EAIiE AGH, Kraków 2002.