



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

LABORATORIUM nr 4

DIAGNOSTYKA UKŁADÓW MECHANICZNYCH

**DIAGNOSTYKA ŁOŻYSKA TOCZNEGO Z
WYKORZYSTANIEM WIDMA ORAZ WIDMA OBWIEDNI**

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	3
2. Cel laboratorium.....	3
3. Teoria	3
4. Przebieg ćwiczenia.....	6

1. Wprowadzenie

Łożyska toczne należą do najczęstszych źródeł awarii w układach rotujących. Wczesne defekty powierzchni bieżni lub elementów tocznych nie powodują jeszcze wzrostu ogólnego poziomu drgań, natomiast generują krótkie impulsy modulujące sygnał w wysokim paśmie częstotliwości. Demodulacja (analiza obwiedni) przenosi te impulsy do zakresu kilku pierwszych rzędów prędkości obrotowej, dzięki czemu linie charakterystyczne BPFO, BPFI, BS i FT stają się czytelne na widmie.

2. Cel laboratorium

Student ma tak przetworzyć 100-sekundowy przebieg pomiarowy, aby w widmie klasycznym lub widmie obwiedni uwidocznic jak największą liczbę linii odpowiadających charakterystycznym częstotliwościom łożyska 6201 oraz ich harmonicznym. Efektem końcowym powinna być seria wykresów ze zaznaczonymi częstotliwościami BPFO, BPFI, BS, FT oraz ich wielokrotnościami.

3. Teoria

Analiza uszkodzeń łożysk opiera się na wykrywaniu drgań, które pojawiają się, gdy element toczny wchodzi w interakcję z defektem. Impulsy te mają bardzo krótki czas trwania, więc ich energia rozciąga się na szerokie pasmo częstotliwości – najczęściej kilka kilohertzów. Ponieważ jednocześnie w sygnale występuje składowa obrotowa rzędu kilku–kilkunastu herców oraz bogate tło szerokopasmowego szumu, konieczne jest zastosowanie sekwencji przetwarzania, które kolejno: izolują pasmo impulsów, demodulują zmiany amplitudowe i przenoszą je w zakres niskich częstotliwości, a na końcu poprawiają stosunek sygnału do szumu.

Kiedy uszkodzony fragment bieżni lub element toczny przechodzi przez strefę obciążenia, powierzchnie styku gwałtownie zmieniają prędkość: następuje **uderzenie mechaniczne**. Impuls kontaktowy trwa mikrosekundy i pobudza całą strukturę – kulkę, koszyk, bieżnię, obudowę, a ostatecznie czujnik przyspieszeń – do drgań własnych. Ze względu na krótki czas narastania impuls ma bardzo szerokie widmo, którego maksimum przypada zwykle między 2 a 15 kHz (rezonanse czujnika i konstrukcji). Jeżeli usterka znajduje się na bieżni zewnętrznej, impuls pojawia się z częstotliwością BPFO, przy uszkodzeniu bieżni wewnętrznej z częstotliwością BPFI itd. W „surowym” widmie FFT energia tych impulsów jest rozmazana w szerokim paśmie i trudna do powiązania z liczbowymi częstotliwościami łożyska.

Poniżej podano klasyczne wzory na cztery podstawowe częstotliwości charakterystyczne łożyska tocznego:

Symbol	Nazwa (ang.)	Wzór [Hz]
BPFO	Ball Pass Frequency, Outer race (uszkodzenia bieżni zewnętrznej)	$\frac{n}{2} f_o \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$
BPFI	Ball Pass Frequency, Inner race (uszkodzenia bieżni wewnętrznej)	$\frac{n}{2} f_o \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$
BS (lub BSF)	Ball Spin Frequency (uszkodzenia elementu tocznego)	$\frac{D}{2d} f_o \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right]$
FT (lub FTF)	Fundamental Train Frequency (uszkodzenia koszyka)	$\frac{1}{2} f_o \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$

Legenda i jednostki

- n – liczba elementów tocznych (szt.)
- f_o – prędkość obrotowa wału / bieżni wewnętrznej [Hz]
- d – średnica kulki (elementu tocznego) [m]
- D – średnica podziałowa łożyska (odległość między środkami kulek) [m]
- α – kąt kontaktu (0° dla łożyska poprzecznego)

Wzory zakładają brak poślizgu i idealną kinematykę; w praktyce obserwowane częstotliwości mogą się nieznacznie różnić ($\leq \pm 1\%$) od wartości teoretycznych.

Filtracja pasmowa przed demodulacją

Impulsy mają największą energię w paśmie od ok. 1 kHz do kilku–kilkunastu kHz, dlatego przed detekcją obwiedni stosuje się filtr dolno- lub pasmowoprzepustowy. W przykładzie wykorzystano obiekt **dsp.LowpassFilter** z pakietu DSP System Toolbox. Parametry:

- *FilterOrder* określa liczbę współczynników FIR (tu 100), co przekłada się na stromość zbocza;
- *PassbandFrequency* ustala częstotliwość odcięcia (8 kHz);
- *PassbandRipple* i *StopbandAttenuation* kontrolują nierówności w paśmie przepuszczania i głębokość tłumienia w paśmie zaporowym.
Filtr zaprojektowany z opcją *DesignForMinimumOrder = false* ma stały rząd, dzięki czemu zachowuje liniową fazę, co jest istotne przy operacjach czasowych.

Obwiednia sygnału

Demodulacja przebiegu odbywa się poprzez wyznaczenie obwiedni. Gdy w łożysku pojawia się niewielki ubytek na bieżni lub uszkodzona kulka, każdy obrót powoduje krótkie uderzenie. Te uderzenia w trakcie normalnej pracy urządzenia znajdują się wysoko w paśmie (kilka-kilkanaście kHz), dlatego w normalnym widmie łatwo giną w szumie.

Obwiednia RMS działa jak „lupa” na te impulsy:

1. **Mierzymy tylko siłę** – bierzemy wartość bezwzględną sygnału
2. **Uśredniamy w małym, przesuwanym oknie** (np. 10 próbek $\approx 0,2$ ms). To tak, jakbyśmy co chwilę pytali: „Jak duża była energia drgania w ostatnim ułamku sekundy?”.
3. **Dostajemy powolny przebieg** – gdy kulka uderza, średnia w oknie rośnie; między uderzeniami spada. Wychodzi coś na kształt delikatnej fali niskiej częstotliwości.

Potem robimy zwykłe FFT tej „powolnej” fali. Zamiast szerokiego szumu dostajemy wąskie, czytelne linie dokładnie tam, gdzie spodziewamy się częstotliwości BPFO, BPFI, BSF lub FTF.

Szybka transformata Fouriera i parametr NFFT

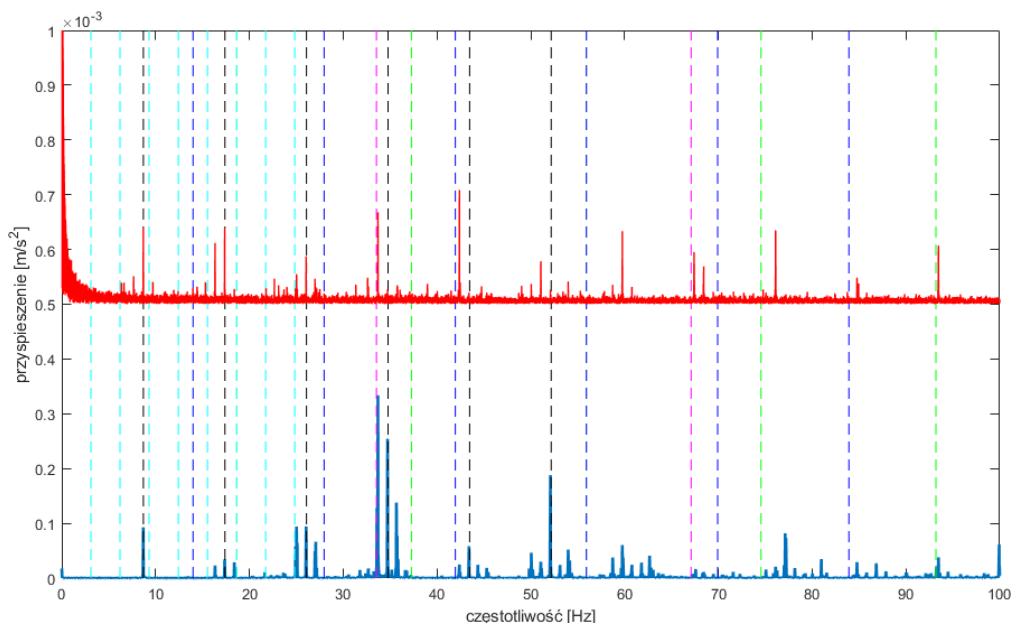
Widmo sygnału oblicza się za pomocą FFT. Zmienna **NFFT** (w skrypcie ustawiana na $L = 2^{23}$) definiuje liczbę punktów transformaty. Im większe NFFT, tym gęstsza siatka częstotliwości i dokładniejsza lokalizacja linii BPFO, BPFI itd. Rozdzielczość częstotliwościowa wynosi $\Delta f = f_s / \text{NFFT}$; dla próbkowania 48 kHz i $\text{NFFT} = 2^{23}$ daje to około 5,7 mHz, co przy częstotliwościach dziesięciu–kilkudziesięciu herców pozwala odseparować harmoniczne rzędu kilkudziesięciu pikseli na ekranie. W praktyce sygnał dzieli się na segmenty tej długości; jeśli cały przebieg jest dłuższy, można obliczyć kilka transformat i je uśrednić, co obniża poziom szumu o $\sqrt{n}$, gdzie n to liczba segmentów.

Nakładanie linii charakterystycznych

Wykresy prezentujące wyniki diagnostyczne powinny oprócz amplitudy FFT zawierać pionowe znaczniki przy teoretycznych częstotliwościach i ich wielokrotnościach. W MATLAB-ie najprościej dodać je funkcją `xline` lub `line` na istniejącym wykresie.

Połączenie teorii z praktyką pozwala ocenić, która część łożyska jest uszkodzona: np. jeżeli w widmie obwiedni rośnie amplituda linii $2,143 f_o$ oraz jej harmonicznym, problemem jest bieżnia zewnętrzna; analogiczny wniosek dotyczy pozostałych częstotliwości.

Rozumiejąc działanie każdego etapu – filtracji pasmowej, widma obwiedni, doboru NFFT – student może świadomie korygować parametry, aż w widmie pojawi się możliwie pełny zestaw linii łożyskowych wraz z harmonicznymi, co przesądza o skuteczności diagnostyki w warunkach przemysłowych.



Rys. 1 Przebiegi linii charakterystycznych wraz z harmonicznymi: niebieski- wydmo przebiegu czasowego, czerwony – widmo obwiedni

Przykładowo, dla łożyska 6021 z 6 kulkami można wyznaczyć następujące częstotliwości charakterystyczne:

Częstotliwość obrotów wału $X = 8.6975$ Hz.

1. Częstotliwości charakterystyczne drgań łożyska 6201 w przypadku:
 - a. uszkodzenia bieżni zewnętrznej BPFO = $2.143 X$;
 - b. uszkodzenia bieżni wewnętrznej BPFI = $3.857 X$;
 - c. uszkodzenia elementu tocznego BS = $1.608 X$;
 - d. uszkodzenia koszyka FT = $0.357 X$;

UWAGA !!: Odpowiednia filtracja, poprawna detekcja obwiedni i rozsądny kompromis między liczbą uśrednień a rozdzielczością częstotliwościową pozwolą zaobserwować pełny zestaw linii łożyskowych i wskazać, czy uszkodzona jest bieżnia zewnętrzna, wewnętrzna, element toczny czy koszyk.

4. Przebieg ćwiczenia

Korzystając ze skryptu 1, wykonaj następujące czynności:

- I. Przygotowanie skryptu do analizy przebiegu z eksperymentu nr 1:
 - **Wczytaj sygnał** z pliku, wybierz drugą kolumnę (większa precyzja), a wektor czasu odczytaj z trzeciej kolumny.

- **Przeprowadź filtrację** pasmową 2 – 10 kHz (lub zastosuj gotowy filtr Lowpass o 8 kHz, jeśli sygnał nasycony jest wyższymi rezonansami). Porównaj widma przed i po filtracji, by upewnić się, że impulsowe szczyty nie zostały wycięte.
- **Wyznacz obwiednię** w trybie *rms* z różnymi WL, obserwując stopień wygładzenia.
- **Zaznacz teoretyczne częstotliwości** BPFO, BPFI, BS, FT na obu widmach oraz – po przeskalowaniu – na wykresie w rzędach.
- **Iteruj parametry:** zmieniaj szerokość pasma filtracji, długość okna obwiedni (WL) i wartość NFFT, aż zobaczysz możliwie najwięcej linii charakterystycznych i ich harmonicznnych.
- **Przygotuj dwa wykresy** (widmo przyspieszeń, widmo obwiedni) z opisanymi osiami

II. Przeprowadzenie diagnostykę łożysk 6201, UC201 i SKF 6205

Dane:

	UC201	SKF 6205
n	8	9
Fo [Hz]	7.89	29.95
d [mm]	7.91	7.94
D [mm]	35	39.5
α	0	0

- **Oceń** co zostało uszkodzone w łożyskach z plików [dane_Lud3_1.mat](#) (łożysko 6201, 6 kulek), [dane_Lud3_2.mat](#) (łożysko UC201, 8 kulek), [dane_Lud3_3.mat](#) (łożysko SKF 6205, 9 kulek).

Oceny:

Za wykonanie ćwiczenie I student otrzymuje ocenę **dostateczną**.

Za wykonanie ćwiczenia I-II student otrzymuje ocenę **bardzo dobrą**.