POLITECHNIKA RZESZOWSKA
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

LABORATORIUM nr 1

DIAGNOSTYKA UKŁADÓW MECHANICZNYCH

FILTRACJA I POMIARY DRGAŃ MECHANICZNYCH

Spis treści

1. Wprowadzenie 3
2. Cel laboratorium 3
3. Teoria 4
   3.1. Filtr i jego rola w analizie sygnału 4
   3.2. Parametry filtra i ich wpływ na sygnał 4
   3.3. Wskaźniki statystyczne 5
   3.4. Częstotliwość próbkowania (Fs) i jej znaczenie w pomiarach drgań 7
4. Przebieg ćwiczenia 7

1. Wprowadzenie

Diagnostyka układów mechanicznych stanowi kluczowy element utrzymania ruchu w wielu gałęziach przemysłu. Regularne monitorowanie stanu maszyn pozwala na wczesne wykrycie usterek, co przekłada się na zwiększenie niezawodności, obniżenie kosztów eksploatacji oraz ograniczenie nieplanowanych przestojów. Podstawową metodą oceny kondycji podzespołów, takich jak łożyska, przekładnie zębate czy wały napędowe, jest analiza drgań. Sygnał drganiowy zawiera cenne informacje o pracy i potencjalnych nieprawidłowościach występujących w układzie.

Współczesne stanowiska diagnostyczne wykorzystują akcelerometry, które rejestrują przyspieszenia drgań w różnych punktach maszyny (np. na obudowie łożyska, przekładni czy samym wale). Dane są następnie przetwarzane cyfrowo, w różnych środowiskach programistycznych, co umożliwia szybką obróbkę i analizę w czasie rzeczywistym. Dzięki temu inżynierowie lub służby utrzymania ruchu mogą w łatwy sposób identyfikować charakterystyczne wzorce sygnału, świadczące o konkretnych stanach awaryjnych, takich jak niewyważenie, rozosiowanie, uszkodzenia elementów łożyskowych czy zużycie zębów przekładni.

Jednym z najważniejszych kroków w analizie sygnałów drganiowych jest filtracja czyli oddzielenie istotnych składowych od szumów i sygnałów niepożądanych (np. pochodzących od innych elementów układu czy zewnętrznych zakłóceń). Poprawne zastosowanie filtrów, zwłaszcza dolnoprzepustowych i górnoprzepustowych, pozwala wyodrębnić określone zakresy częstotliwości istotne z punktu widzenia danej diagnostyki (np. składowe związane z prędkością obrotową, drganiami własnymi konstrukcji lub częstotliwościami charakterystycznymi łożysk).

Kolejnym ważnym aspektem jest analiza sygnału w dziedzinie czasu, w tym wyznaczanie wskaźników statystycznych. Parametry takie jak wartość skuteczna (RMS), średnia, wariancja czy kurtoza dostarczają informacji o energii i „charakterze” przebiegu drgań. Niektóre wskaźniki (np. kurtoza) są szczególnie wrażliwe na nagłe, impulsowe zaburzenia, które w diagnostyce rzeczywistych maszyn mogą wynikać z uszkodzonych elementów łożyska lub z powierzchni zębów przekładni.

W laboratorium prezentowanym poniżej badane są różne parametry filtrów oraz wpływ wielkości okna czasowego na obliczane wskaźniki statystyczne. Dodatkowo, poprzez wywołanie drgań własnych stanowiska (poprzez gwałtowne wymuszenie), sprawdza się, w jaki sposób analizowane parametry reagują na krótkotrwałe zjawiska o niskiej częstotliwości. W ten sposób możliwe jest poznanie podstawowych zasad praktycznej diagnostyki drganiowej, która stanowi fundament w utrzymaniu ruchu nowoczesnych zakładów przemysłowych. Taka wiedza przydaje się także w laboratoriach dotyczących rozpoznawania konkretnych uszkodzeń (niewyważenia, rozosiowania czy uszkodzeń łożysk i przekładni), gdzie sprawna analiza sygnałów drganiowych pozwala znacznie skrócić czas poszukiwania i eliminacji przyczyn awarii.

2. Cel laboratorium

W ramach laboratorium student analizuje wpływ parametrów filtra cyfrowego na sygnał drganiowy w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz bada zmiany podstawowych wskaźników statystycznych. Celem jest zrozumienie, w jaki sposób filtracja pozwala na skuteczniejszą interpretację drgań harmonicznych w praktycznych zastosowaniach diagnostycznych.

3. Teoria

Aby zrozumieć, dlaczego filtracja oraz wyznaczanie wskaźników statystycznych odgrywają tak istotną rolę w diagnostyce układów mechanicznych, należy szczegółowo omówić podstawowe pojęcia związane z analizą sygnałów harmonicznych. Poniższe sekcje zawierają bardziej dogłębną charakterystykę kluczowych zagadnień i pokazują ich praktyczne zastosowanie w utrzymaniu ruchu.

3.1. Filtr i jego rola w analizie sygnału

Filtr to układ (często cyfrowy, rzadziej analogowy w nowoczesnych aplikacjach), którego zadaniem jest modyfikacja sygnału w taki sposób, by przepuszczał tylko wybrane zakresy częstotliwości (tzw. pasma przepuszczania), a tłumił pozostałe (pasma zaporowe). W diagnostyce drgań ma to kluczowe znaczenie, ponieważ:

- **Część składowych sygnału jest nieistotna** z punktu widzenia poszukiwanej usterki (np. szum o bardzo wysokiej częstotliwości, który nie jest związany z pracą łożysk tocznych).
- **Filtracja umożliwia koncentrację na tych składowych**, które są związane z potencjalnymi anomaliami (np. pasmo drgań charakterystyczne dla niewyważenia wirnika, niewłaściwego posadowienia maszyny lub uszkodzeń tocznych elementów łożyska).

Najczęściej stosowane rodzaje filtrów w analizie drgań to:

1. **Filtr dolnoprzepustowy (low-pass)** – przepuszcza składowe częstotliwości poniżej ustalonego progu, tłumiąc wyższe częstotliwości.
    - Przykład praktyczny: usuwanie wysokoczęstotliwościowego szumu występującego w trakcie rejestrowania drgań wentylatora, aby móc skupić się na częstotliwości obrotów i ewentualnym rezonansie konstrukcji.
2. **Filtr górnoprzepustowy (high-pass)** – przepuszcza składowe powyżej określonej częstotliwości granicznej, wycinając pasmo częstotliwości niskich.
    - Przykład praktyczny: odseparowanie składowej o bardzo niskiej częstotliwości związanej z przemieszczaniem fundamentu, które w diagnostyce może być uznane za efekt „tła”.
3. **Filtr pasmowoprzepustowy (band-pass)** – przepuszcza pewien wybrany przedział częstotliwości i tłumi sygnały spoza niego.
    - Przykład praktyczny: skupienie się tylko na zakresie ok. 500–1000 Hz, w którym występują częstotliwości charakterystyczne dla obciążeń łożyska (BPFO, BPFI, BSF, FTF), aby wyraźniej zobaczyć impulsy wskazujące na uszkodzenie elementów tocznych.

3.2. Parametry filtra i ich wpływ na sygnał

W środowisku MATLAB (oraz w innych narzędziach do cyfrowego przetwarzania sygnałów) filtry opisuje się zwykle za pomocą kilku parametrów. Zrozumienie ich znaczenia pozwala świadomie dobierać konfigurację filtra:

1. **N (Filter Order) – rząd filtra**
    - Określa „złożoność” filtra i decyduje o stromości zbocza pomiędzy pasmem przepuszczania a pasmem zaporowym.
    - Wyższy rząd filtra oznacza bardziej strome przejście (lepsze odcięcie niepożądanych częstotliwości), ale może też skutkować większymi zniekształceniami fazowymi i być trudniejszy do zaprojektowania.
    - W diagnostyce drgań, jeżeli kluczowe jest precyzyjne wycięcie np. szumu o wysokiej częstotliwości bez utraty informacji o piku diagnostycznym, stosuje się filtry o wyższym rzędzie. Trzeba jednak pamiętać o możliwych „przesunięciach fazowych” w sygnale, które mogą utrudniać interpretację czasową.
2. **Fp (Passband Frequency) – częstotliwość graniczna pasma przepuszczania**
    - Dla filtra dolnoprzepustowego jest to maksymalna częstotliwość, którą filtr ma przepuścić bez tłumienia.
    - Dla filtra górnoprzepustowego będzie to minimalna częstotliwość, poniżej której filtr zaczyna tłumić sygnał.
    - W diagnostyce określa się ją często w oparciu o znajomość prędkości obrotowej maszyny, częstotliwości charakterystycznych (np. uszkodzeń łożysk) czy rezonansów konstrukcji.
3. **Rp (Passband Ripple) – zafalowanie w paśmie przepuszczania**
    - Definiuje, jak duże zmiany amplitudy (zafalowania) są dopuszczalne w zakresie częstotliwości, które mają być przepuszczane.
    - W analizie drgań zbyt duże „zafalowanie” może wprowadzić niepożądane zniekształcenia sygnału, utrudniając np. detekcję impulsów (użytecznych w diagnostyce łożysk).
4. **Rst (Stopband Attenuation) – tłumienie w paśmie zaporowym**
    - Informuje, jak mocno filtr tłumi sygnały w zakresie częstotliwości, które nie mają być przepuszczane.
    - W kontekście diagnostyki drgań istotne jest, by tłumienie było wystarczająco duże, aby niepożądane składowe (np. szum wysokoczęstotliwościowy czy energiczne drgania fundamentu) nie dominowały w sygnale.

Każdy z powyższych parametrów wpływa na kształt końcowego sygnału, zarówno w dziedzinie czasu (np. wygładzenie przebiegu, eliminacja bardzo szybkich zmian), jak i częstotliwości (wycięcie lub ograniczenie konkretnych pasm).

3.3. Wskaźniki statystyczne

Po zastosowaniu filtracji (lub przed jej zastosowaniem) sygnał może zostać przeanalizowany w dziedzinie czasu. Przy tej analizie wykorzystuje się wskaźniki statystyczne, które opisują w pewnym stopniu „charakter” sygnału – czy jest on bliski przebiegowi losowemu, czy też zawiera wyraźne piki, czy posiada dużą energię drgań itp. Najważniejsze z nich to:

1. **Średnia (mean)**
    - Podstawowa miara statystyczna sygnału, definiowana jako uśredniona wartość wszystkich próbek w wybranym przedziale czasu.
    - W drganiach maszyn przemysłowych zwykle oczekuje się, że średnia będzie bliska zeru (po usunięciu składowej stałej), zwłaszcza w przypadku sygnałów wibroakustycznych.
    - Wzrost średniej może oznaczać np. błędną kompensację offsetu czujnika bądź występowanie „niesymetrycznych" zdarzeń w sygnale.
2. **Wariancja (variance) i odchylenie standardowe (standard deviation)**
    - Opisują rozrzut próbek wokół wartości średniej.
    - W diagnostyce maszyn duża wariancja (a więc i duże odchylenie standardowe) zwykle wskazuje na intensywne drgania, które mogą wynikać z niewyważenia, rozosiowania lub innych problemów mechanicznych.
3. **RMS (root mean square) – wartość skuteczna**
    - Jeden z najpopularniejszych wskaźników w monitoringu stanu maszyn, ponieważ dobrze oddaje „energię" drgań.
    - W praktyce wzrost wartości RMS ponad normę (ustaloną empirycznie dla danej maszyny) często stanowi sygnał ostrzegawczy o pogarszającym się stanie łożysk lub innych elementów.
4. **Moment 3. rzędu i skośność (skewness)**
    - Pozwalają określić asymetrię rozkładu próbek wokół wartości średniej.
    - Dodatnia skośność oznacza, że w sygnale dominują wartości większe od średniej; ujemna wskazuje na częstsze występowanie wartości mniejszych.
    - W diagnostyce drgań wskazują, czy sygnał zawiera „jednostronne" zaburzenia (np. uderzenia w jednym kierunku).
5. **Kurtoza (kurtosis)**
    - Opisuje „spiczastość" lub „wypłaszczenie" rozkładu sygnału w porównaniu do rozkładu normalnego.
    - Bardzo istotna w detekcji krótkotrwałych, impulsywnych zjawisk drganiowych (np. uszkodzeń elementów tocznych łożysk). Jej gwałtowny wzrost oznacza pojawienie się nagłych skoków amplitudy sygnału.
6. **Współczynnik szczytu (crest factor)**
    - Jest to stosunek maksymalnej wartości sygnału (peak) do wartości skutecznej (RMS).
    - Duży współczynnik szczytu sugeruje obecność krótkich, wysokich pików przy relatywnie niższej wartości skutecznej.
7. **Współczynnik kształtu (shape factor)**

- Również pomocny w identyfikacji kształtu sygnału i określaniu obecności impulsów.
- Przydaje się w diagnostyce, gdy kluczowe jest odróżnienie sygnałów stałych (np. stacjonarnych drgań obrotowych) od sygnałów niestacjonarnych (z uderzeniami, stochastycznymi impulsami).

3.4. Częstotliwość próbkowania (Fs) i jej znaczenie w pomiarach drgań

Ostatnim kluczowym parametrem w analizie sygnałów drganiowych jest **częstotliwość próbkowania (Fs)** – liczba próbek pobieranych w ciągu jednej sekundy (wyrażana w hercach, Hz). W opisanym laboratorium przyjęto wartość **Fs = 48 kHz**.

1. **Zasada Nyquista**
   - Zgodnie z zasadą Nyquista-Shannona, aby poprawnie odtworzyć sygnał o maksymalnej częstotliwości f_{max}, konieczne jest próbkowanie z częstotliwością co najmniej dwukrotnie większą od f_{max}.
   - Przykład: rejestrowanie drgań do 20 kHz wymaga próbkowania z częstotliwością co najmniej 40 kHz, aby uniknąć aliasingu (nakładania się widm).
2. **Dobór częstotliwości próbkowania w diagnostyce**
   - Jeśli analizuje się np. drgania silników niskiej mocy, czasami wystarcza Fs rzędu kilku kHz. W przypadku szybkobieżnych maszyn (np. turbiny), konieczne może być próbkowanie znacznie powyżej 100 kHz.
   - Zbyt niska częstotliwość próbkowania może spowodować utratę istotnych składowych sygnału (np. pików związanych z uszkodzeniem rzędu tysięcy Hz).
3. **Konsekwencje nieprawidłowego doboru Fs**
   - Zaniżona wartość Fs może prowadzić do zjawiska aliasingu (niemożność odróżnienia wyższych częstotliwości od ich „obrazu" w niższym paśmie), co uniemożliwia prawidłową interpretację stanu maszyny.
   - Zbyt wysoka wartość Fs generuje duże ilości danych, co bywa problemem przy długotrwałym monitoringu lub analizie online (np. większe zapotrzebowanie na pamięć i moc obliczeniową).

W ćwiczeniu laboratoryjnym **nie zaleca się zmiany częstotliwości próbkowania**, ponieważ każda taka modyfikacja wymagałaby dostosowania układu pomiarowego. Utrzymanie stałej wartości Fs ułatwia też analizę porównawczą różnych filtrów i parametrów.

4. Przebieg ćwiczenia

UWAGA: Wskaźniki statystyczne w aplikacji oznaczone są dwoma kolorami, czerwony przed filtracją a pomarańczowy po filtracji. Aplikacja używa dane zapisane pod nazwą 'Dane_lab2.mat'

Korzystając z aplikacji oraz stanowiska pomiarowego, wykonaj następujące czynności:

I. **Modyfikacja parametrów filtra w środowisku MATLAB**

- **Polecenie:**

1. Uruchom aplikację w MATLABie i upewnij się, że częstotliwość próbkowania (Fs) wynosi 48 kHz.
2. Zmieniaj rząd filtra (**N**) na różne wartości (np. 2, 4, 15, 60). Zaobserwuj, jak rośnie dokładność odcinania niepożądanych składowych wraz ze wzrostem rzędu filtra (N).
3. Dla filtra dolnoprzepustowego modyfikuj częstotliwość graniczną (**Fp**; np. 20 Hz, 500 Hz, 10000 Hz). Przeanalizuj, w którym momencie obniżanie częstotliwości granicznej (Fp) powoduje odcięcie zbyt wielu istotnych informacji.
4. Wypróbuj różne poziomy zafalowania w paśmie przepuszczania (**Rp**; np. 0.01 dB, 0.03 dB, 0.06 dB) oraz tłumienia w paśmie zaporowym (**Rst**; np. 20 dB, 40 dB, 60 dB). Oceń, kiedy opłaca się zastosować silniejsze tłumienie w paśmie zaporowym (Rst), a kiedy mniejsze zafalowanie w paśmie przepuszczania (Rp).

- UWAGA: Parametr Fs=48kHz to częstotliwość próbkowania, i nie powinien być zmieniany bez rzeczywistej zmiany częstotliwości próbkowania podczas pomiarów.

II. **Badania wpływu długość bufora danych**

- **Polecenie:**

1. Przygotuj jeden wariant długości sygnału (np. 1 s, 10 s, 20 s).
2. Dla wybranego wariantu zapisz (w wordzie) w formie wykresu: średnią (mean), wartość maksymalną (maximum), wariancję (variance), odchylenie standardowe (standard deviation), RMS, moment 3. Rzędu (3rd o. moment), skośność (skewness), kurtozę (kurtosis), współczynnik szczytu (crest factor) i współczynnik kształtu (form factor).
3. Zauważ, jak krótkotrwałe zdarzenia (impulsy) rozmywają się w dłuższych przedziałach czasowych.
4. Sprawdź, w jakim stopniu krótsze okno (liczba sek. Interwału czasowego) ułatwia detekcję pików sygnału, ale zwiększa zmienność statystyk.

III. **Przeprowadzenie testów stanowiskowych**

- **Polecenie:**

1. Wyreguluj układ zasilania (falownik) na stanowisku laboratoryjnym, aby wirnik pracował w zakresie 15–20 Hz (ok. 900–1200 obr./min).
2. Przeprowadź 20-sekundową rejestrację sygnału z akcelerometru i około 10. sekundy wywołaj niskoczęstotliwościowe drgania własne stanowiska (np. lekkim uderzeniem ręką w konstrukcję). Wykorzystaj do tego skrypt test.m
3. Po zakończeniu rejestracji (20 s) zapisz dane w pliku Dane_lab2.mat komendą save('Dane_lab2.mat','yt').

IV. **Analiza wskaźników statystycznych w funkcji czasu**

- **Polecenie:**

1. Wczytaj plik Dane_lab2.mat do MATLAB-a.

2. Ustaw parametry filtra w domyślnej konfiguracji i skomentuj powstałe na wykresach wszystkie wskaźniki statystyczne. Skoncentruj się na momencie (ok. 10. sekundy), w którym wprowadzono wymuszenie.
3. Zapisz wykresy zmian istotnych wskaźników statystycznych przy wystąpieniu drgań własnych stanowiska wynikających z wprowadzonego wymuszenia. Sprawdź, w jakim stopniu RMS, kurtoza, crest factor czy inne wskaźniki reagują na gwałtowny impuls.
4. Następnie tak dobierz parametry filtra dolnoprzepustowego, aby „przepuścić" pasmo, w którym znajdują się: częstotliwość drgań własnych całego stanowiska oraz częstotliwość obrotów wirnika. Zidentyfikuj, które ustawienia filtra pozwalają najlepiej wychwycić chwilowe wzrosty amplitudy.
5. Dokonaj analizy, które ze wskaźników statystycznych są wrażliwe na gwałtowne zmiany w sygnale, tzn. znaczy na wystąpienie drgań własnych stanowiska, a które są od tych zmian niezależne.

V. Opracowanie wyników diagnostyki

- **Polecenie:**
  - Przygotuj dane w formie wykresów z komentarzem, w którym zostanie opisane:
    - Zmiany istotnych wskaźników statystycznych przy wystąpieniu drgań własnych stanowiska wynikających z wprowadzonego wymuszenia
    - Reakcję sygnału na wywołane drgania własne w 10. sekundzie.
    - Wpływ filtracji na uwidacznianie i tłumienie kluczowych składowych częstotliwości.
  - Podaj rekomendacje ustawienia filtra i długości analizy, które najlepiej sprawdzą się w diagnostyce układu mechanicznego gdzie wystąpiły niskoczęstotliwościowe drgania własne stanowiska
  - Na wykresach przedstaw istotne wskaźniki statystyczne dowodzące wystąpienie impulsowego wymuszenia.

Oceny:

Za wykonanie ćwiczenia I-II student otrzymuje ocenę **dostateczną**.

Za wykonanie ćwiczenia I-IV student otrzymuje ocenę **dobrą**.

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