



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

LABORATORIUM nr 5

DIAGNOSTYKA UKŁADÓW MECHANICZNYCH

**DIAGNOSTYKA PRZEKŁADNI ZĘBATEJ Z UŻYCIEM
WIDMA RZĘDÓW**

Spis treści

| | |
|---|---|
| 1. Wprowadzenie..... | 3 |
| 2. Cel laboratorium..... | 3 |
| 3. Teoria | 3 |
| Drgania przekładni i częstotliwość zazębienia | 3 |
| Ubytek lub pęknięcie zęba..... | 3 |
| Widmo rzędów (order spectrum)..... | 4 |
| Diagnostyka uszkodzonej przekładni | 5 |
| 4. Przebieg ćwiczenia..... | 7 |

1. Wprowadzenie

Przekładnia zębata generuje drgania periodyczne o częstotliwości równej częstotliwości zazębienia (gear-mesh frequency, GMF) oraz jej harmoniczne. Jeżeli pojawi się ubytek lub pęknięcie zęba, w sygnale powstaje impuls występujący raz na każdy obrót koła zębatego, w widmie powoduje to charakterystyczne wąskie wstęgi boczne (side-bandy) wokół GMF, oddalone o częstotliwość obrotową uszkodzonego koła. Im większa amplituda bocznych wstęg lub im więcej harmonicznych GMF z wyraźnymi wstęgami bocznymi, tym poważniejsze uszkodzenie.

Występuje też wiele innych charakterystycznych częstotliwości, które mogą wskazywać na różne typy uszkodzeń.

2. Cel laboratorium

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z praktyczną metodą analizy drgań przekładni zębatej przy użyciu widma rzędów. Student ma dobrać i zastosować podstawowe filtry i transformaty tak, aby w przekształconym sygnale wyeksponować częstotliwości związane z pracą przekładni. Przede wszystkim częstotliwość zazębienia koła wejściowego oraz jej harmoniczne i wstęgi boczne. Następnie, na podstawie otrzymanego widma, należy ocenić, czy w badanej przekładni mogą występować uszkodzenia pojedynczych zębów lub inne nieregularności, porównując sygnały z różnych warunków obciążenia.

3. Teoria

Drgania przekładni i częstotliwość zazębienia

Gdy dwa koła zazębiają się, kolejne pary zębów wchodzi i wychodzą z kontaktu z częstotliwością zwaną **gear-mesh frequency** (GMF). Jeśli koło ma z zębów i obraca się z prędkością f_{rot} [Hz], GMF wynosi:

$$GMF = z \cdot f_{rot}$$

Idealna przekładnia (bez błędów geometrii i luzu) wytwarza sinusoidę o częstotliwości GMF oraz kilka jej harmonicznych (2·GMF, 3·GMF, ...). W praktyce luz międzyzębny, niewspółosiowość czy odchyłki kształtu dodają **wstęgi boczne** (side-bandy) odległe dokładnie o f_{rot} od GMF. Amplituda i liczba wstęg bocznych są czułym wskaźnikiem stanu przekładni.

Ubytek lub pęknięcie zęba

Jeśli brakuje fragmentu zęba albo ząb jest pęknięty, przy każdym obrocie koła powstaje pojedynczy impuls. W widmie objawia się to:

- silną wstęgą w częstotliwości obrotowej koła,
- symetrycznymi wstęgami bocznymi wokół GMF oraz jego harmonicznych,
- często wzrostem harmonicznych GMF powyżej 3-go rzędu.

Porównywanie widm przy różnych obciążeniach pozwala odróżnić stały błąd produkcyjny (widoczny zawsze) od aktywnie pracującego defektu (silniejszego pod obciążeniem).

Widmo rzędów (order spectrum)

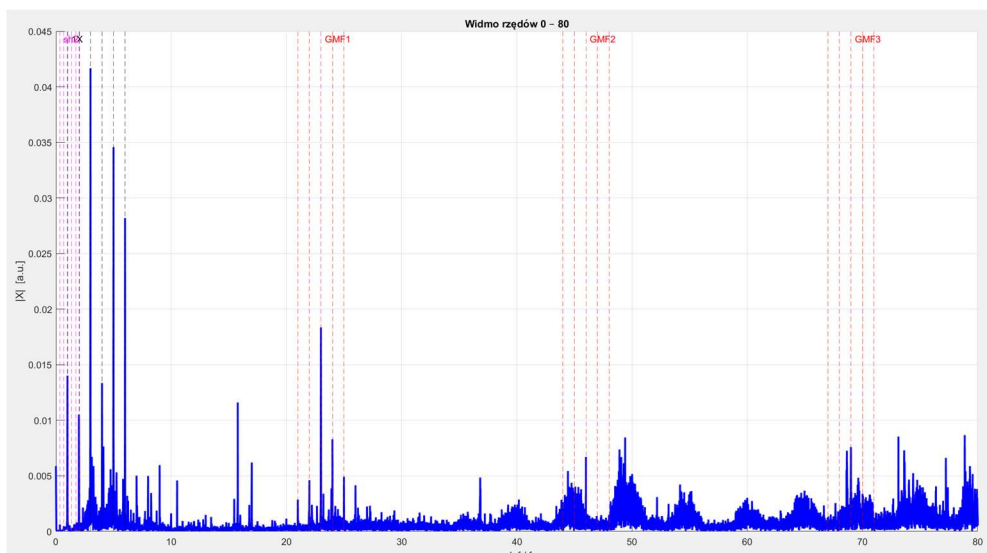
Ponieważ częstotliwość obrotowa może się zmieniać (wcześniejsze lub późniejsze obroty wału), praktycy przeliczają oś Hz na **rzędy**:

$$rz\acute{a}d = \frac{f}{f_{rot}}$$

W tej skali:

- rząd 1,00 to sama prędkość obrotowa,
- GMF wypada w rzędzie z (liczba zębów),
- wstęgi boczne ustawiają się dokładnie ± 1 rząd od GMF niezależnie od niewielkich wahań prędkości obrotowej.

Widmo rzędów ułatwia porównywanie pomiarów o różnych prędkościach i szybko ujawnia zależności między harmonicznymi.

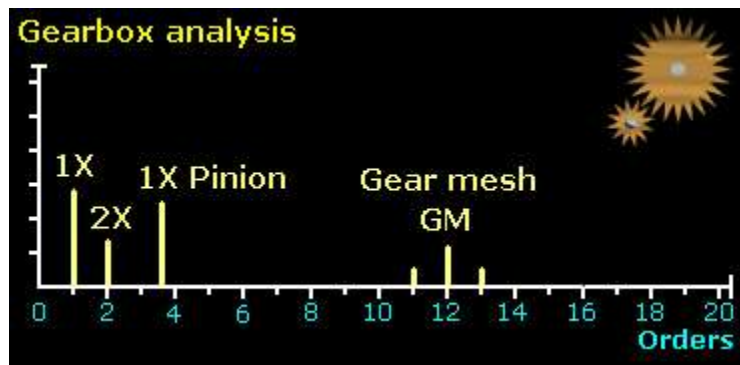


Rys. 1 Przebiegi linii charakterystycznych wraz z harmonicznymi

Przekładnia zębata jednostopniowa bez uszkodzeń generuje na wykresie widma szereg charakterystycznych częstotliwości.

Zwykle można znaleźć wartości szczytowe przy:

- częstotliwości obrotów wału wejściowego 1X,
- drugiej harmoniczej częstotliwości obrotów wału wejściowego 2X,
- częstotliwości obrotów wału wyjściowego 1X Pinion,
- częstotliwości zazębienia kół zębatych GM,
- mogą występować boczne wstęgi wokół częstotliwości zazębienia wynoszące $GM \pm 1X$. **Jednak będą one na niskim poziomie.**



Rys. 2 Przebiegi linii charakterystycznych wraz z harmonicznymi w prawidłowej przekładni

Diagnostyka uszkodzonej przekładni

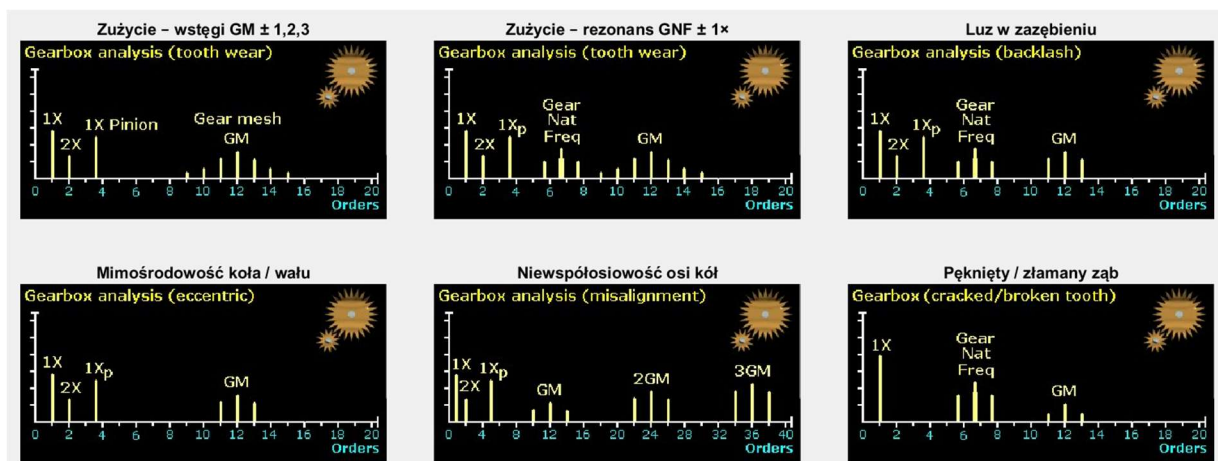
Poniżej przedstawiono podstawowe pojęcia użyte w diagnostyce przekładni wraz z tłumaczeniem możliwych wad i ich obecności w widmie.

Tab. 1 Podstawowe pojęcia w diagnostyce przekładni jednorzędowej z kołami z zębami prostymi

| Termin | Co to oznacza w przekładni i w skrypcie | Co widać na widmie |
|-----------------------------------|---|--|
| Wał wejściowy (shaft 1) | Wał napędzany bezpośrednio przez silnik. Na nim osadzone jest koło z 23 zębami. | Linie w rzędzie 1X, 2X, 3X... ($1 \times f_{rot}$) |
| Wał wtórny (shaft 2) | Drugi wał przekładni, napędzany przez pierwsze koło; jego prędkość = prędkość wału 1 podzielona przez przełożenie (tu 2,91 : 1). | Linie w rzędach $\approx 0,343 \times$, $0,686 \times$, $1,03 \times \dots$ (harmoniczne wtórne). |
| Gear-Mesh Frequency (GMF) | Częstotliwość zazębienia: ile razy na sekundę zęby koła wchodzi w kontakt. Dla koła 23-zębowego $GMF = 23 \times f_{rot}$ | Główna linia w rzędzie 23; jej harmoniczne w 46, 69 ... |
| Wstęgi boczne (side-bandy) | Wąskie linie symetrycznie po obu stronach GMF (lub jego harmonicznym) odsunięte dokładnie o prędkość obrotową wału. | $GMF \pm 1 \times$, $GMF \pm 2 \times \dots$ Wskazują na impuls raz na obrót: np. pęknięty ząb, niewspółosiowość, duży luz. |
| Rząd (order) | Bezwymiarowa częstotliwość $\frac{f}{f_{rot}}$ pozwala porównywać widma przy różnych obrotach – linie obrotowe są zawsze w rzędzie 1, GMF dla koła 23 zębów zawsze w rzędzie 23, itp. | |

Tab. 2 Podstawowe możliwe defekty przekładni

| Diagnoza | Opis linii / pasm | Prawdopodobna przyczyna |
|--|--|---|
| Zużycie zębów – etap wczesny | Wokół podstawowej częstotliwości zazębienia ($23 \times$ prędkość obrotowa wału wejściowego) pojawiają się wyraźne „wstęgi boczne” oddalone o dokładnie jedną, dwie lub trzy prędkości obrotowe wału (czyli o $1 \times$, $2 \times$ i $3 \times$ prędkość obrotową). | Zęby ścierają się nierównomiernie; każdorazowe wejście zużytego zęba w kontakt wywołuje impuls, który moduluje sygnał zazębienia. Im większe boczne wstęgi, tym większe zużycie. |
| Zużycie zębów – etap zaawansowany | Oprócz wstęp bocznych wokół zazębienia pojawia się szeroki, często „rozmyty” pik przy częstotliwości własnej pary kół (rezonans konstrukcji przekładni). Ta rezonansowa linia również ma boczne wstęgi oddalone o jedną prędkość obrotową wału. | Materiał zębów utracił sztywność; zazębienie pobudza konstrukcję przekładni do drgań własnych. |
| Luz w zazębieniu | Układ bocznych wstęp identyczny jak przy zużyciu, ale wysokość pików zazębienia i pików rezonansowych maleje po dociżeniu przekładni – pod obciążeniem luz jest eliminowany. | Można odróżnić zwykły luz od stałego zużycia: jeżeli po włączeniu obciążenia wstęgi słabną, problemem jest luz, a nie ścieranie zębów. |
| Mimośrodowe koło lub wygięty wał | Wokół częstotliwości zazębienia widać tylko jedną parę bocznych wstęp oddalonych o jedną prędkość obrotową; brak dalszych par (± 2 , ± 3). | Koło ma mimośrodowość (środek geometryczny \neq środek obrotu) lub wał jest wygięty; powoduje to impuls raz na obrót, który moduluje całe zazębienie tylko z pierwszą harmoniczną. |
| Niewspółosiowość osi kół | Boczne wstęgi pojawiają się nie tylko przy podstawowej częstotliwości zazębienia ($23 \times$ prędkość obrotowa), ale również przy jej drugiej i trzeciej wielokrotności; każda z tych harmonicznym ma własną parę wstęp w odstępie jednej prędkości obrotowej. | Oś obrotu jednego koła jest pochylona względem osi drugiego; powoduje cykliczne zmiany luzu przy każdym obrocie, co moduluje wszystkie harmoniczne zazębienia. |
| Pęknięty lub ułamany ząb | Bardzo wysoka linia w widmie dokładnie na prędkości obrotowej uszkodzonego koła; dodatkowo pobudzona jest częstotliwość własna przekładni z bocznymi wstęgami oddalonymi o jedną prędkość obrotową. W przebiegu czasowym: jeden impuls znacząco większy od innych, powtarzający się raz na obrót koła. | Impuls pojawia się zawsze, gdy uszkodzony ząb wchodzi w zazębienie; analiza w dziedzinie czasu (impulsy nierównych wysokości w sekwencji zębowej) jest najpewniejszym potwierdzeniem pęknięcia. |



Rys. 3 Spodziewany wygląd linii charakterystycznych przy poszczególnych defektach

4. Przebieg ćwiczenia

Korzystając ze skryptu 1, wykonaj następujące czynności:

- I. Dla danych pomiarowych pozyskanych na stanowisku laboratoryjnym przeprowadzić analizę sygnału wykorzystując dowolnie znane operacje w dziedzinie czasu i/lub częstotliwości
 - Przedstawić widmo rzędów.
 - Na uzyskane widmo rzędów nanieść charakterystyczne częstotliwości związane z działaniem przekładni.
 - Przetwarzanie sygnału doskonalić w celu wykrycia w widmie rzędów jak największej liczby charakterystycznych częstotliwości.
 - Ocenic co zostało uszkodzone (o ile jest uszkodzone) bądź zużyte w przekładni z plików z danymi bez obciążenia i z obciążeniem. Porównujemy wykresy z obciążeniem i bez.

Mamy dwa zestawy danych z obciążeniem i bez obciążenia.

Oceny:

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