

# Instrukcja do ćwiczenia – jednopłaszczyznowe wyważanie wirników

## 1. Podstawowe pojęcia związane z niewyważeniem

**Stan niewyważenia** – stan wirnika określony takim rozkładem masy, który w czasie wirowania wywołuje zmienne obciążenia na podporach wirnika i jego zginanie. W przypadku wirników sztywnych jest to równoważne z nie pokrywaniem się centralnej głównej osi bezwładności z osią wirnika.

**Niewyważenie** – wektorowa wielkość fizyczna równa iloczynowi masy niewyważonej (umownej masy skupionej o określonej mimośrodowości, wywołującej w czasie obrotu zmienne obciążenie na podporach wirnika i jego zginanie) i jej mimośrodowości. Wektor niewyważenia jest prostopadły do osi wirnika, przechodzi przez środek ciężkości masy niewyważonej i wiruje razem z wirnikiem. Jego kierunek pokrywa się z kierunkiem mimośrodowości masy niewyważonej.

**Wyważanie** – operacja zmniejszająca niewyważenia za pomocą korekcji masy wirnika.

**Niewyważenie statyczne** – stan niewyważenia przy którym oś wirnika i jego centralna główna oś bezwładności są równoległe. Niewyważenie statyczne zmniejsza się przez wyważenie statyczne, przeprowadzone w jednej płaszczyźnie korekcji.

**Niewyważenie momentowe** - stan niewyważenia przy którym oś wirnika i jego centralna główna oś bezwładności przecinają się w środku ciężkości wirnika.

**Niewyważenie quasi-statyczne** – stan niewyważenia, przy którym oś wirnika i jego centralna główna oś bezwładności przecinają się poza środkiem ciężkości wirnika.

**Niewyważenie dynamiczne** – stan niewyważenia, przy którym oś wirnika i jego centralna główna oś bezwładności są skośne. Niewyważenie dynamiczne zmniejsza się przez wyważenie dynamiczne, przeprowadzane przynajmniej w dwóch płaszczyznach korekcji (w przypadku wirników sztywnych).

## 2. Charakterystyczne symptomy niewyważenia wirnika

- częstotliwość drgań spowodowanych niewyważeniem jest równa częstotliwości obrotowej,
- przy prędkościach obrotowych wyraźnie mniejszych od krytycznych, amplituda drgań spowodowanych niewyważeniem zmienia się porównywalnie z kwadratem prędkości obrotowej,
- typowa trajektoria drgań spowodowanych niewyważeniem jest stabilna, ma kształt okręgu lub elipsy,
- kierunek precesji wirnika jest zgodny z kierunkiem obrotów; kierunek precesji może być przeciwny w przypadku słabo lub niesymetrycznie podpartych wirników, zwłaszcza w zakresie prędkości obrotowych leżących między rezonansem poziomym i pionowym,
- przy stałej prędkości obrotowej faza drgań też jest stała.

### 3. Metoda amplitudowo-fazowa

Pomiarowi podlega amplituda i faza drgań synchronicznych z obrotami wirnika (tzn. o częstotliwości równej częstotliwości obrotowej). Jeżeli widmo drgań zawiera inne składowe o istotnej amplitudzie, należy zastosować synchroniczną filtrację wąskopasmową sygnału pomiarowego. Wyważanie przeprowadza się przy nominalnej prędkości obrotowej, a jeżeli wirnik może pracować z różnymi prędkościami należy wybrać maksymalną prędkość obrotową. Wszystkie pomiary muszą być wykonywane przy jednakowej prędkości obrotowej. Wyważania nie należy przeprowadzać przy prędkościach zbliżonych do rezonansowych, ponieważ w tych warunkach eksponują się nieliniowości układu i nie można przyjąć wymaganego w opisanych procedurach założenia o liniowym wpływie dokładanej masy na drgania wirnika.

Spełnione muszą być także założenia, że wszystkie masy (kalibracyjne i korekcyjne) są mocowane w tej samej odległości od osi wirnika i w tej samej płaszczyźnie, prostopadłej do osi wirnika (zwanej płaszczyzną korekcji), oraz że wirnik jest sztywny, czyli m.in. wyważanie odbywa się przy prędkości obrotowej niższej od pierwszej prędkości krytycznej układu wirnik-łożyska.

#### **Synchronizacja kąta mocowania mas z mierzoną fazą drgań**

Należy obrócić wirnik tak, aby taśma odblaskowa (nacięcie, występ itp.) na wirniku znajdowało się bezpośrednio przed czujnikiem kąta obrotu. Miejsce zamocowania czujnika drgań wyznacza wtedy umowny kąt odniesienia  $0^\circ$ . Kąty mierzone są w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów wirnika.

#### **Procedura jednopłaszczyznowego wyważania wirnika wymaga trzech uruchomień maszyny:**

1. Przebieg wstępny: włączyć maszynę i po ustabilizowaniu się prędkości obrotowej odczytać i zapisać prędkość obrotową, wyznaczyć amplitudę i fazę drgań. Wielkości tworzą wektor  $\vec{O}$ , który umieszczamy na wykresie współrzędnych biegunowych. Faza wektora jest kątem od położenia czujnika drgań, mierzonym w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów wirnika. Amplituda wektora jest proporcjonalna do amplitudy zmierzonych drgań. Wyłączyć maszynę.
2. Przebieg kalibracyjny, którego zadaniem jest określenie wpływu dołożenia masy (zwanej kalibracyjną) do wirnika na jego drgania – zamocować na wirniku masę kalibracyjną. Masa kalibracyjna powinna być tak dobrana, aby jej położenie spowodowało zmniejszenie (a przynajmniej nie spowodowało zwiększenia amplitudy) drgań. Masę kalibracyjną można oszacować według wzoru:

$$m_c = \frac{0,05 \cdot m_r \cdot g}{r_c \cdot \omega^2}$$

gdzie:

$m_r$ -masa wirnika [kg];

$r_c$  - mimośrodek zamocowania masy kalibracyjnej [m];

$\omega$  - częstość obrotowa wirnika [rad/s];

$g$  – przyspieszenie ziemskie  $9.81 \text{ m/s}^2$ ;

$m_c$  – masa kalibracyjna [kg].

Masę kalibracyjną zamocować po przeciwnej stronie kąta zmierzonego jako faza drgań w przebiegu pierwszym.

Po zamocowaniu masy kalibracyjnej należy uruchomić maszynę i po ustabilizowaniu prędkości obrotowej odczytać i wyznaczyć amplitudę i fazę drgań. Zmierzone wielkości umieścić na wykresie biegunowym - utworzą wektor  $\vec{O} + \vec{T}$ . Od wektora  $\vec{O} + \vec{T}$  należy odjąć wektor  $\vec{O}$ . Tak powstały wektor  $\vec{T}$  określa odpowiedź wirnika na dołożoną masę kalibracyjną.

3. **Przebieg sprawdzający – obliczyć i zamocować masę korekcyjną.** Zmiana drgań spowodowana dołożeniem masy korekcyjnej powinna być równa co do wartości i przeciwna w fazie co do drgań zmierzonych w przebiegu pierwszym. Zakładając liniową zależność zmian drgań od wielkości dołożonej masy, otrzymujemy:

$$m_k = m_c \frac{\vec{O}}{\vec{T}}$$

gdzie  $m_k$  oznacza masę korekcyjną. Położenie masy korekcyjnej różni się od położenia masy kalibracyjnej o kąt równy kątowi między wektorem  $\vec{T}$ , a wektorem  $\vec{O}$ . Kąty te są mierzone zgodnie z kierunkiem obrotów wirnika.

Jeżeli masa korekcyjna nie może być dodana w wyznaczonym położeniu, można ją podzielić proporcjonalnie pomiędzy dwa najbliższe otwory do mocowania masy korekcyjnej.

Po zamocowaniu masy korekcyjnej należy uruchomić maszynę i po ustabilizowaniu prędkości obrotowej odczytać i wyznaczyć amplitudę i fazę drgań

#### 4 Przykładowy przebieg ćwiczenia

##### Urządzenia pomiarowe

- Optoelektryczny miernik prędkości obrotowej
- Analizator czasu rzeczywistego SIGLAB
- Czujniki: przemieszczenia i przyspieszeń drgań

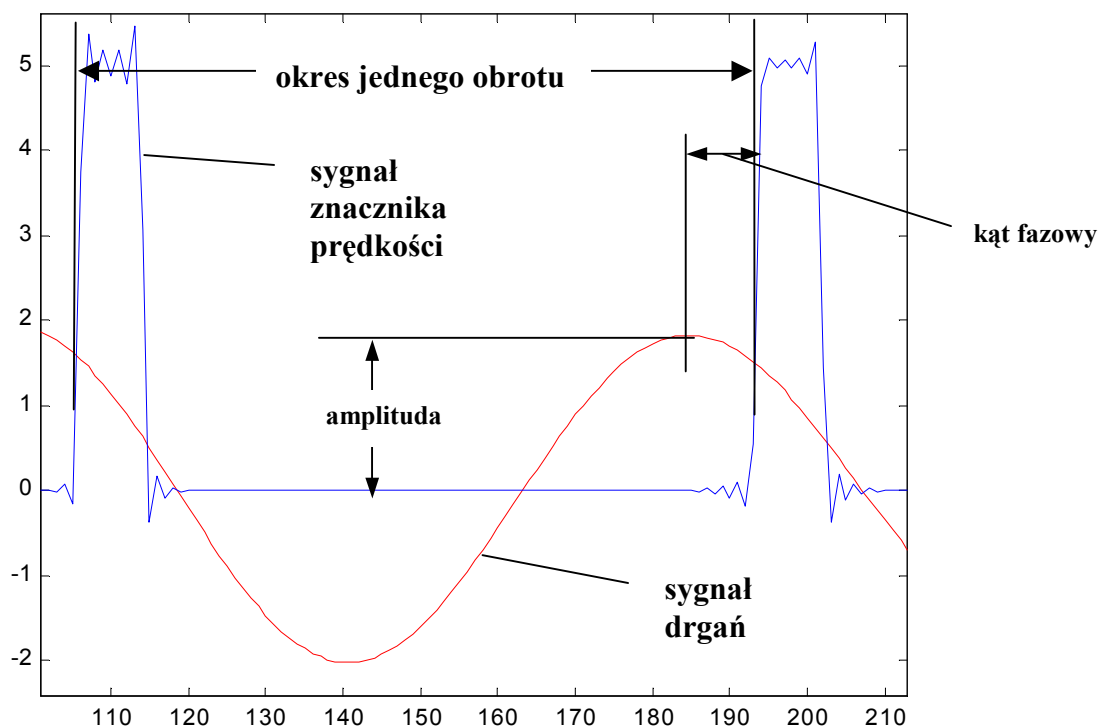
Rejestracja i analiza sygnału przeprowadzona przy wykorzystaniu programu MATLAB i współpracującego z nim analizatora SigLab.

##### *Pomiar pierwotnego niewyważenia: pomiar amplitudy drgań oraz kąta przesunięcia fazowego przy nominalnej prędkości obrotowej*

Wstępna analiza sygnału:

- pasmowa filtracja sygnału drganiowego dla częstotliwości obrotowej,
- wyznaczenie amplitudy drgań,
- wyznaczenie kąta przesunięcia fazowego maksymalnej amplitudy drgań w stosunku do znacznika prędkości.

Rysunek 1 przedstawia przykładowy sygnał i znacznik prędkości. Mierzonym sygnałem jest prędkość drgań. Na rysunku zaznaczono szukane wielkości: amplitudę i kąt fazowy. Kąt fazowy wyznaczono przeciwnie do ruchu obrotowego jako kąt, o który sygnał wyprzedza znacznik prędkości.



Rysunek 1. Wykres przedstawiający zależności znacznika obrotów i sygnału drganiowego.

Amplitudę drgań i kąt fazowy określa maksimum sygnał drgań.

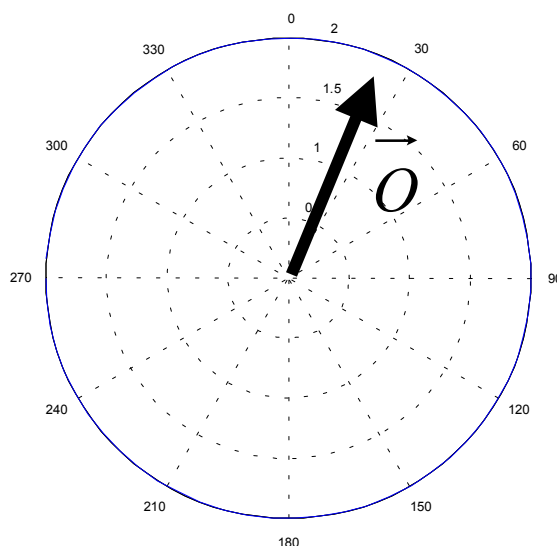
### ***Pomiar niewyważenia z masą próbną***

Drugim etapem jest określenie amplitudy drgań i kąta fazowego przy zamocowanej masie próbnej.

### ***Sporządzenie diagramu wektorowego i wyznaczenie położenia i wartości masy korekcyjnej***

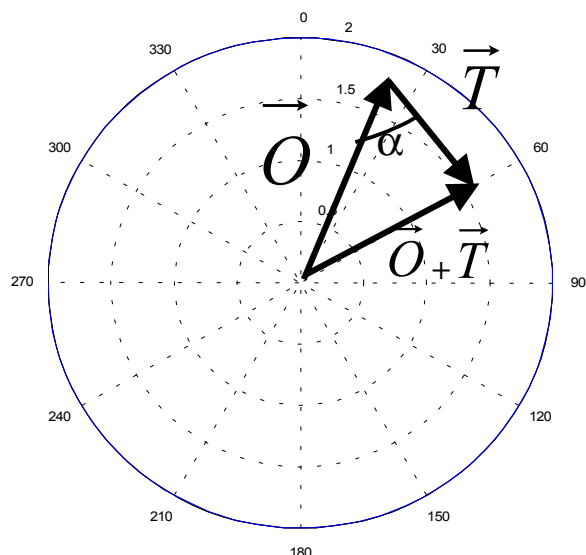
Na wynik każdego pomiaru składa się amplituda drgań oraz kąt fazowy. Wynik pomiaru niewyważenia pierwotnego oznaczamy jako wektor  $\vec{O}$ , wynik pomiaru niewyważenia z masą próbną oznaczamy jako  $\vec{O} + \vec{T}$ .

- na wykresie biegunowym umieścić wektor  $\vec{O}$  długość wektorów jest proporcjonalna do amplitudy drgań (rys. 2), kąt jest równy kątowi przesunięcia fazowego,



**Rysunek 2. Wektory reprezentujące wyniki pomiarów**

- Następnie umieścić wektor  $\vec{O} + \vec{T}$  i odjąć od niego wektor  $\vec{O}$ , otrzymamy wektor  $\vec{T}$  (rys. 3),



Rysunek 3. Wyznaczanie wektora  $\vec{T}$  i kąta  $\alpha$  przesunięcia masy korekcyjnej w stosunku do masy próbnej

- wyznaczyć długość wektora  $\vec{T}$  korzystając z twierdzenia cosinusów – otrzymana wartość określa niewyważenie od masy próbnej,
- oblicz masę korekcyjną wg wzoru:

$$\text{masa korekcyjna} = \text{masa próbna} \cdot \frac{|\vec{O}|}{|\vec{T}|},$$

korzystamy tu z warunku proporcjonalności intensywności drgań do wielkości niewyważenia,

- wyznaczyć kąt  $\alpha$  z twierdzenia sinusów pomiędzy wektorem  $\vec{O}$  i  $\vec{T}$  – jest to kąt przesunięcia masy korekcyjnej w stosunku do położenia masy próbnej .

**Pomiar niewyważenia z masą korekcyjną- pomiar sprawdzający poprawność przebiegu ćwiczenia.**

Określenie amplitudy drgań i kąta fazowego przy zamocowanej masie korekcyjnej

**Sprawozdanie powinno zawierać**

1. Podstawy teoretyczne dotyczące wyważania maszyn wirnikowych.
2. Schemat układu mechanicznego i pomiarowego.
3. Opis procesu wyważania.
4. Wykresy sygnałów pomierzonych drgań i znacznika prędkości.
5. Wykres biegunowy drgań ilustrujący proces wyważania.
6. Zestawienie wyników (prędkości obrotowej przy której był wykonywany pomiar, amplitud drgań i kątów fazowych) dla kolejnych pomiarów.
7. Wnioski dotyczące przeprowadzonego ćwiczenia.