

POLITECHNIKA



BIAŁOSTOCKA

WYDZIAŁ



INŻYNIERII

ZARZĄDZANIA

KATEDRA ZARZĄDZANIA PRODUKCJĄ

Instrukcja do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu:

Podstawy diagnostyki technicznej

Kod przedmiotu: **KS05513, KN05513**

Ćwiczenie Nr 5

DIAGNOSTYKA ŁOŻYSK TOCZNYCH

O p r a c o w a ł :

dr inż. Arkadiusz Łukjaniuk

Białystok 2022

Wszystkie prawa zastrzeżone

Wszystkie nazwy handlowe i towarów występujące w niniejszej instrukcji są znakami towarowymi zastrzeżonymi lub nazwami zastrzeżonymi odpowiednich firm odnośnych właścicieli.

CEL ĆWICZENIA: celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodami diagnostyki łożysk tocznych oraz ocena stanu łożysk tocznych badanego urządzenia, a także opanowanie przez studentów umiejętności pracy z systemem KSD-400.

1. WPROWADZENIE

Łożyska toczne są powszechnie stosowane w maszynach i w czasie eksploatacji należą do najczęściej wymienianych elementów. Uszkodzenie węzła łożyskowego stanowi najczęstszą przyczynę awarii maszyn. Aby temu zapobiec niezbędne jest monitorowanie i diagnozowanie stanu węzłów łożyskowych. Ma ono na celu wykrycie we wczesnym stadium wszelkiego rodzaju zmian stanu dynamicznego maszyn, stopnia zużycia, rodzaju i poziomu uszkodzeń, a efekcie wskazać terminu remontu maszyny, co pozwoli uniknąć przykrych skutków awarii i prawidłowo zaplanować proces produkcyjny.

Łożyska można podzielić na dwie grupy (w zależności od kierunku przenoszenia obciążenia):

- poprzeczne (poddawane obciążeniom prostopadłym do osi wału);
- wzdłużne (poddawane obciążeniom zgodnym z kierunkiem osi wału).

Jednak w praktyce przenoszone obciążenia mają charakter bardziej złożony (obciążenia działają jednocześnie w dwóch kierunkach – promieniowym i osiowym), dlatego też podział łożysk jest dokonywany w zależności od kąta β obciążenia łożyska (liczonego od prostej prostopadłej do płaszczyzny zewnętrznej pierścienia łożyska):

- $0^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$ – łożysko poprzeczne;
- $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ – łożysko wzdłużne.

Dalszy podział łożysk to: kulkowe i wałeczkowe, a te ostatnie dzielą się na:

- walcowe;
- stożkowe;
- baryłkowe;
- igiełkowe.

Ze względu na cechy konstrukcyjne łożyska toczne można podzielić:

- jedno-, dwu- lub wielorzędowe;
- wahliwe;
- samonastawne;
- jedno- lub dwustronnie uszczelnione.

Podstawą długowieczności pracy łożysk jest ich prawidłowy dobór, montaż i smarowanie. Temperatura pracy takich łożysk nie powinna przekraczać 70°C , dźwięk powinien być regularny i niski. Gwizdy lub piski świadczą o zbyt małych luzach roboczych lub niedostatecznym smarowaniu. Natomiast grzechotanie,

nierównomierny szum lub dudnienie wskazują na zbyt duży luz, uszkodzenie bieżni i elementów tocznych [1]. Przyczyną uszkodzenia łożyska może być ponad normatywne obciążenie, zbyt ciasne pasowania lub nieskuteczne uszczelnienia. Każde z tych przyczyn zostawiają swój specyficzny ślad na uszkodzonym łożysku, co konsekwencji pozwala ją zidentyfikować.

Niewłaściwy montaż łożyska można określić po rysach, zadarciach, czy też wgłębieniach bieżni.

Pęknięcia pierścienia łożyska najczęściej jest spowodowane błędami konstrukcyjnymi (zbyt duży docisk łożyska śrubą lub rowek konstrukcyjny ułatwiający osadzenie łożyska).

Korozyja łożyska spowodowana jest niewłaściwym magazynowaniem lub uszczelnieniem.

Zanieczyszczenie łożyska może być spowodowane w efekcie dostania się piasku do oprawy, montażu brudnych części, niewłaściwego uszczelnienia, brudnego smaru, itp..

Wgłębienia na bieżniach od elementów tocznych są spowodowane oddziaływaniem wymuszeń dynamicznych pracujących w sąsiedztwie maszyn na elementy toczne łożyska będącego w stanie spoczynku.

Łożyska pracy wytwarzają drgania. Źródłami tych drgań są:

- zmiana liczby elementów tocznych przenoszących obciążenie powodujące zmianę sztywności układu i wytwarzające drgania parametryczne;
- błędy wykonania elementów łożyska;
- niewyważenie koszyka;
- mimośrodowość bieżni w stosunku do osi obrotu wału;
- luz promieniowy lub osiowy;
- drgania własne poszczególnych elementów łożyska [2].

Częstotliwości tych drgań można wyznaczyć z następujących zależności:

- element toczny:

$$f_o = 0,5f_n \frac{D}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right); \quad (1)$$

- bieżnia wewnętrzna:

$$f_w = 0,5nf_n \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right); \quad (2)$$

- bieżnia zewnętrzna:

$$f_z = 0,5nf_n \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right); \quad (3)$$

- koszyk:

$$f_k = 0,5 f_n \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right), \quad (4)$$

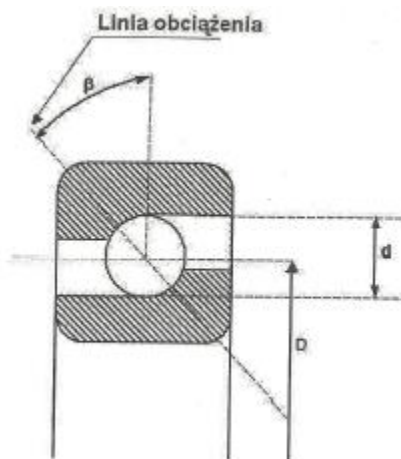
gdzie: d – średnica elementu tocznego (rys. 1);

D – średnica podziałowa łożyska;

β – kąt obciążenia łożyska;

n – liczba elementów tocznych;

f_n – częstotliwość pierścienia zewnętrznego względem pierścienia wewnętrznego [3].



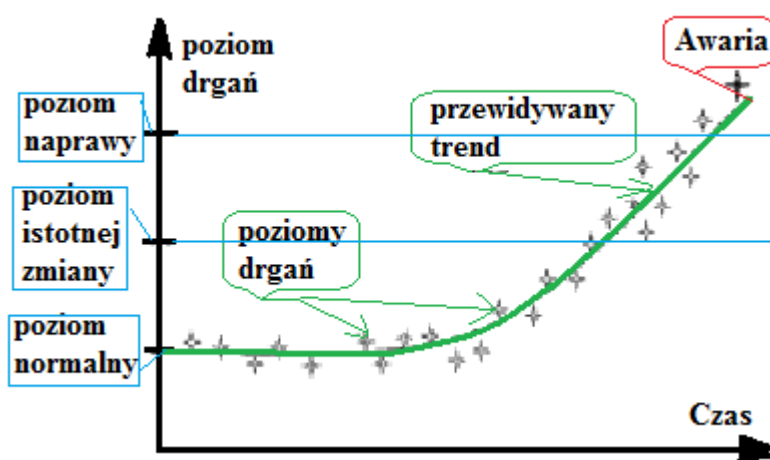
Rys. 1. Przekrój poprzeczny łożyska kulkowego [3]

Badania diagnostyczne pokazały następujące fazy degradacji łożysk tocznych:

- **Faza szumowa** – nowe łożysko posiada szerokopasmowy charakter przyspieszeń drgań (wartość szczytowa zawiera się od 0,98-1,96 m/s²). W trakcie powstawania mikrouszkodzeń pasmo drgań się zawęża do 4-10 kHz, a na tle tego szumu pojawiają się wysokie impulsy o częstotliwości proporcjonalnej do liczby mikrouszkodzeń elementów łożyska. Pod koniec tej fazy przyspieszenie drgań obudowy łożyska może dochodzić do 40 m/s² i jest to sygnał do planowej wymiany łożyska podczas najbliższego postoju maszyny.
- **Faza drganiowa** – w niewymienionym w końcu fazy szumowej łożysku następują ubytki masy, co powoduje dalsze obniżenie średniej częstotliwości drgań. Skutkuje to znacznym wzrostem wartości szczytowej przyspieszenia drgań, a trwałość takiego łożyska może wynosić od kilku godzin do kilku tygodni. Na tym etapie następuje zwiększenie luzów łożyska, a w rezultacie spadek wartości przyspieszenia i średniej częstotliwości drgań.
- **Faza termiczna** – praca łożyska w takim stanie technicznym powoduje deformację jego elementów i ubytki masy powodujące wzrost oporów ruchu,

w rezultacie wzrost sił tarcia, wydzielania się ciepła, a więc i wzrost temperatury łożyska, co obniża własności wytrzymałościowe i powoduje awarię.

Do wykrywania uszkodzeń łożysk stosuje się stetoskop (osoby z doświadczeniem w tej dziedzinie i służy do wykrywania zaawansowanych uszkodzeń), pomiar temperatury łożysk lub obserwację wzrokową. Jednak najbardziej efektywną metodą badań stanu węzłów łożyskowych jest **diagnostyka drganiowa**. Polega ona na okresowych lub ciągłych pomiarach szerokopasmowych poziomów drgań i śledzeniu trendu zmian tych poziomów. Zmierzone poziomy drgań są porównywane z wartościami granicznymi (rys. 2) podawanymi przez normy (np. ISO 10816).



Rys. 2. Przykład trendu szerokopasmowego poziomu drgań obudowy łożyska.

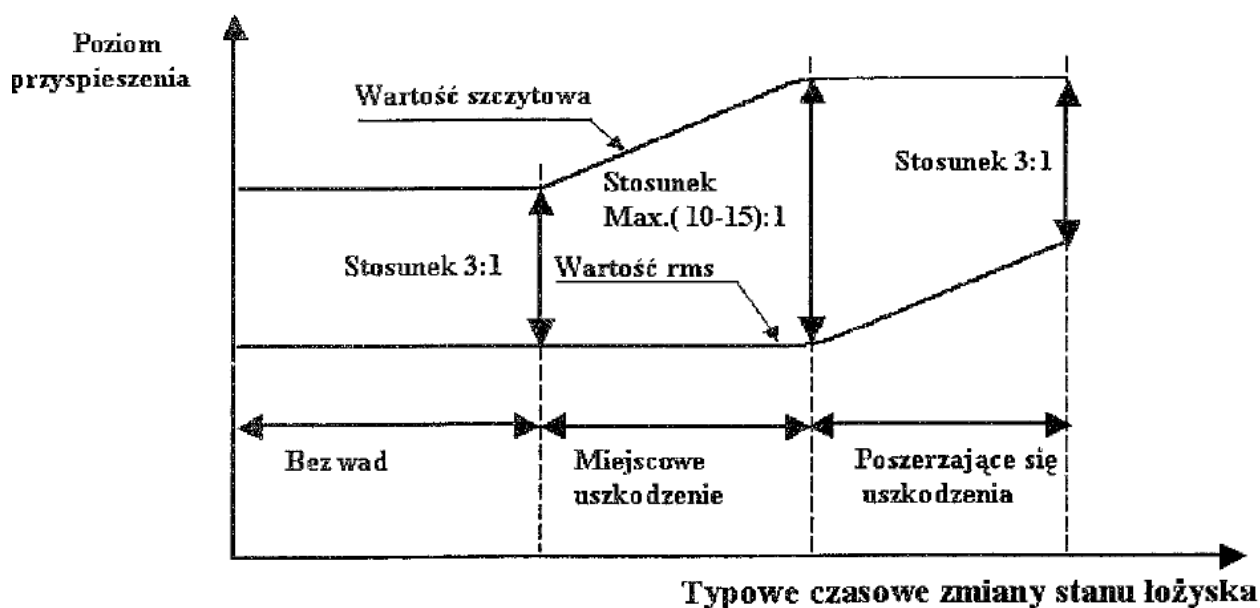
Rozmieszczenie i rodzaj czujników do pomiaru poziomu drgań omawiane było w ćwiczeniu Nr 3. Najczęściej stosowanymi czujnikami są czujniki piezoelektryczne. W zależności od potrzebnej częstotliwości granicznej badanych drgań rozróżnia się następujące sposoby mocowania tych czujników:

- docisk ręczny (częstotliwość rezonansowa $f_r=2\text{kHz}$);
- za pomocą magnesu - $f_r=7\text{kHz}$;
- przez przyklejanie - $f_r=10\text{-}28\text{kHz}$;
- za pomocą wkręta $f_r=28\text{kHz}$.

Przy analizie trendu szerokopasmowych poziomów drgań zakłada się, że wzrost poziomu drgań o około 2,5 raza powoduje, że dana maszyna musi być sklasyfikowana do wyższej (gorszej) klasy stanu technicznego, a 10-krotny wzrost poziomu drgań powoduje, że stan techniczny maszyny z dobrego zmienia się na niedopuszczalny.

Szerokopasmowość drgań powoduje, że do wykrycia defektów łożysk we wczesnej fazie stosuje się pomiar przyspieszeń drgań (wartości szczytowe i skuteczne).

Kolejną metodą (oprócz diagnostyki drganiowej) jest *pomiar współczynnika szczytu*. Jest to iloraz wartości szczytowej sygnału drganiowego do jego wartości skutecznej w badanym zakresie częstotliwości drgań. Współczynnik szczytu może być estymatą stanu łożyska tocznego (rys. 3) [2]. Z badań wynika, że w początkowym etapie pracy łożyska (bez wad) wynosi on 3:1, a następnie wzrasta w miarę pogarszania się stanu technicznego do wartości (10-15):1. W ostatnim okresie zużycia łożyska wartość współczynnika szczytu spada do 3:1 (jest to spowodowane wzrostem luzów łożyska).

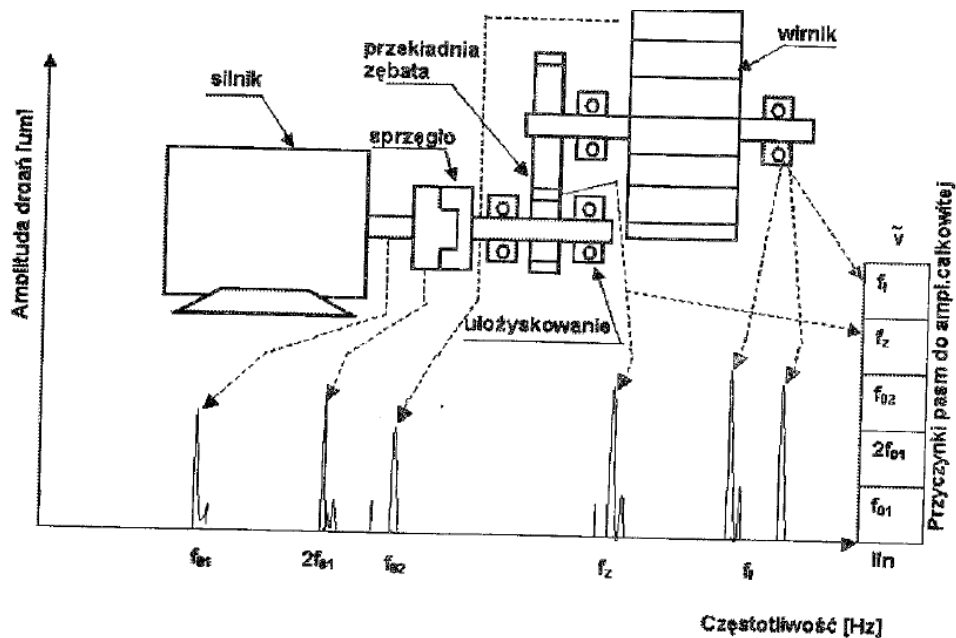


Rys. 3. Wartość współczynnika szczytu wyznaczona podczas badań łożyska tocznego podczas eksploatacji [2].

Metoda ta diagnozuje stan łożysk, ale nie określa przyczyn jego zużycia. Wady tej pozbawione są metody:

- *analizy widmowej drgań;*
- *analizy obwiedni drgań.*

W analizie widmowej drgań sygnał drganiowy rozkłada się na składowe harmoniczne (najczęściej za pomocą algorytmu FFT). Obserwacja trendu wzrostu wartości amplitud poszczególnych harmonicznych podczas kolejnych pomiarów dostarcza nam informacji o tym, które elementy łożyska (maszyny) ulegają zużyciu. Wartości częstotliwości dla konkretnego łożyska można w prosty sposób wyznaczyć z zależności (1-4). Przykład zarejestrowanego widma drgań elementów maszyny jest przedstawiony na rys. 4 [2].

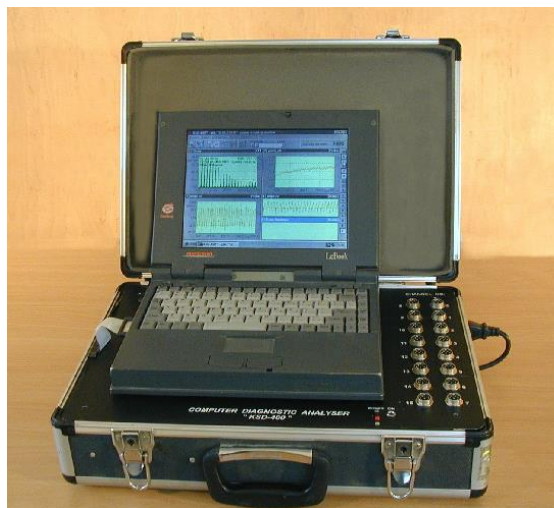


Rys. 4. Widmo drgań elementów prostej maszyny

2. KOMPUTEROWY SYSTEM DIAGNOSTYCZNY KSD-400

2.1. WPROWADZENIE

Komputerowy analizator drgań KSD-400 [7] jest wszechstronnym wielokanałowym urządzeniem pomiarowym przeznaczonym do badania drgań maszyn wirujących oraz ich diagnostyki, regulacji turbin, badania silników spalinowych itp. Na rys. 5 przedstawiony jest widok analizatora diagnostycznego KSD-400. Szczegółowe omówienie tego systemu zostało w ćwiczeniu Nr3, więc tutaj przypomnę tylko kilka niezbędnych informacji.

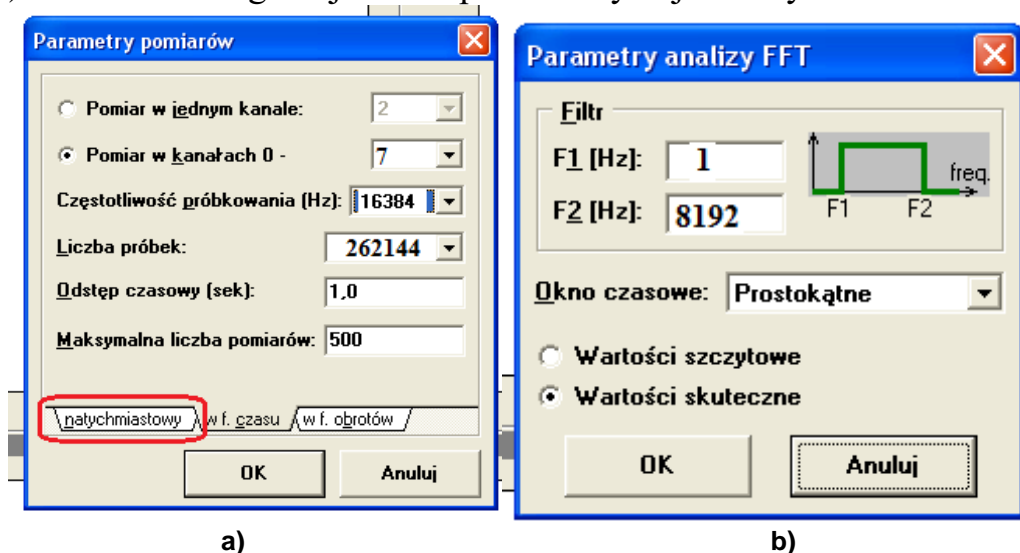


Rys. 5. Widok analizatora diagnostycznego KSD-400.

2.2. PRZYGOTOWANIE ANALIZATORA DO PRACY

Uruchomienie programu:

- połączyć kablem USB walizkę pomiarową z komputerem;
- podłączyć czujniki pomiarowe do gniazd wejściowych analizatora;
- włączyć zasilanie walizki pomiarowej;
- sprawdzić stan naładowania akumulatorów komputera;
- sprawdzić stan naładowania akumulatorów walizki pomiarowej (powinna się świecić się zielona dioda LED);
- uruchomić komputer w środowisku Windows;
- uruchomić program pomiarowy plikiem *KSD400.exe*;
- ustawić konfigurację okien pomiarowych jak na rys. 6.



Rys. 6. Konfiguracja okien pomiarowych: a) ustawianie częstotliwości próbkowania, liczby próbek, kanałów pomiarowych i trybu pomiaru; b) ustawianie parametrów analizy FFT.

2.3. SKRÓTY KLAWISZOWE DO OBSŁUGI PROGRAMU

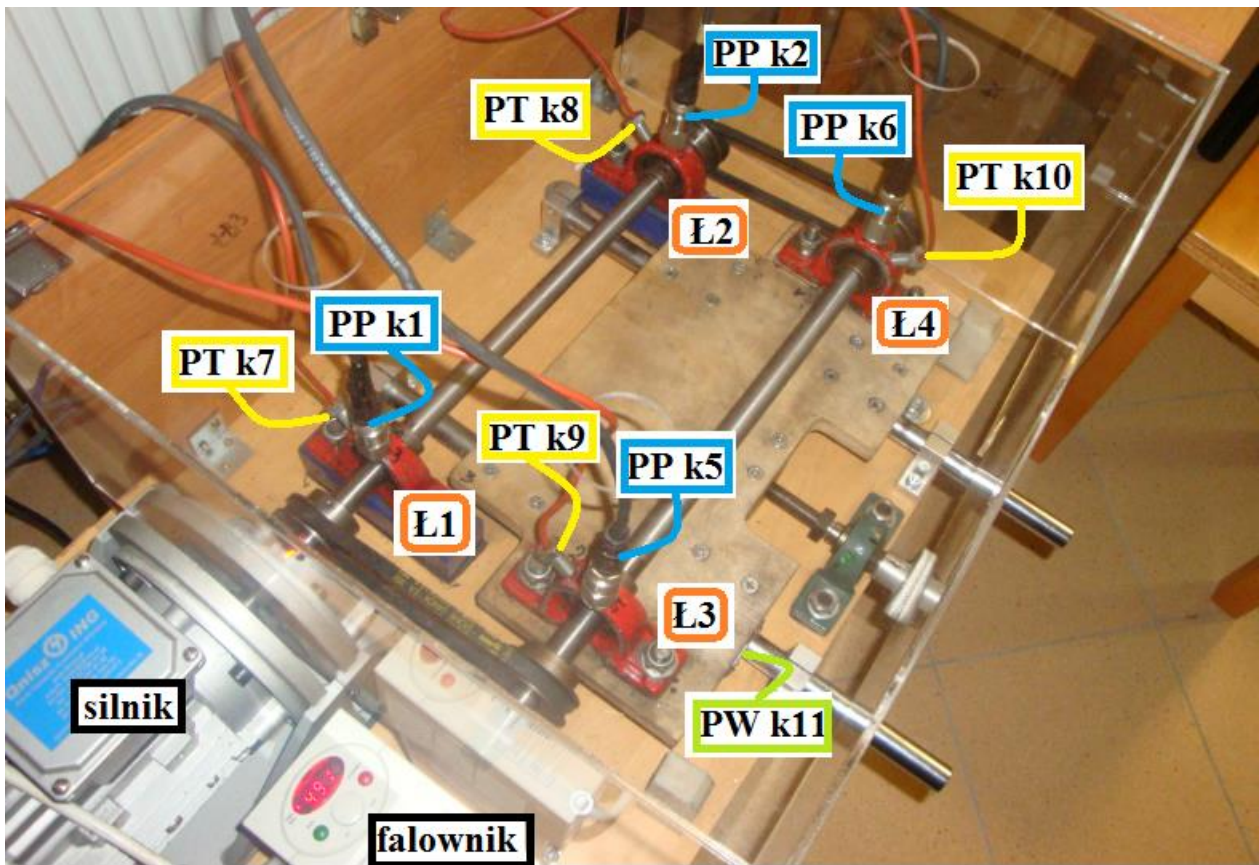
- Odczytaj wyniki pomiarów: **Ctrl+O.**
- Zapisz wyniki pomiarów: **Ctrl+S.**
- Włącz wyświetlanie wartości RMS **Ctrl+R.**
- Drukuj: **Ctrl+P.**
- Analiza Fouriera: **Ctrl+F.**
- Powiększanie wykresu: **Ctrl+Z.**
- Włączenie automatycznego skalowania: **Ctrl+A.**
- Zaznacz punkty pomiaru: **Ctrl+T.**
- Próbki: **Ctrl+B.**
- Tryb pracy X_Y: **Ctrl+X.**
- Parametry analizy FFT: **F 10.**
- Parametry pomiarów: **F 12.**

3. PRZEBIEG POMIARÓW

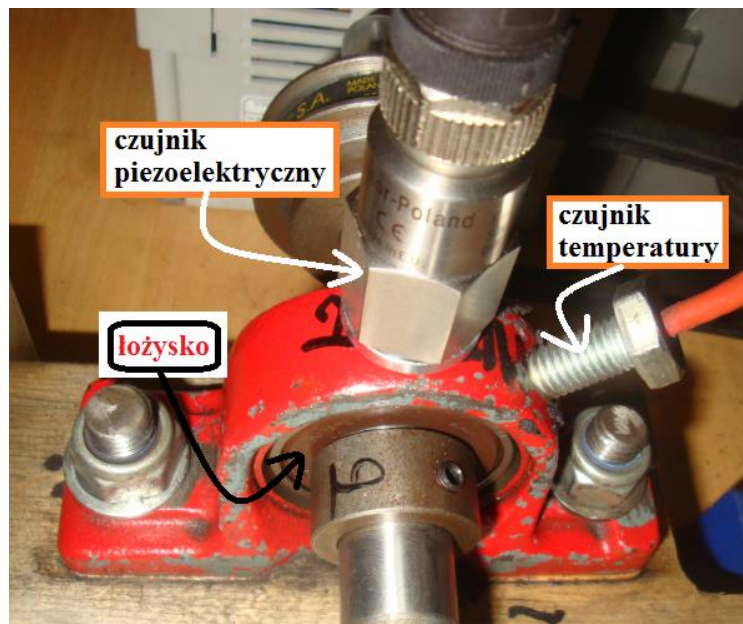
W ćwiczeniu tym zadaniem studentów jest zaobserwowanie zmian parametrów pracy łożysk (temperatury, wartości maksymalnych i RMS przyspieszenia drgań, zmiany współczynnika szczytu) pod wpływem zmiany obciążenia (wartość obciążenia łożysk zmieniana jest za pomocą pokrętki naciągu paska klinowego – rys. 7).

Kolejność operacji przy wykonywaniu ćwiczenia:

- a) przeprowadzić konfigurację stanowiska pomiarowego (rys. 7): sprawdzić podłączenia czujników piezoelektrycznych i temperatury do odpowiednich kanałów systemu KSD-400, a także czujnika wiropędowego do pomiaru przemieszczenia wału II względem wału I przenoszącego napęd z silnika;

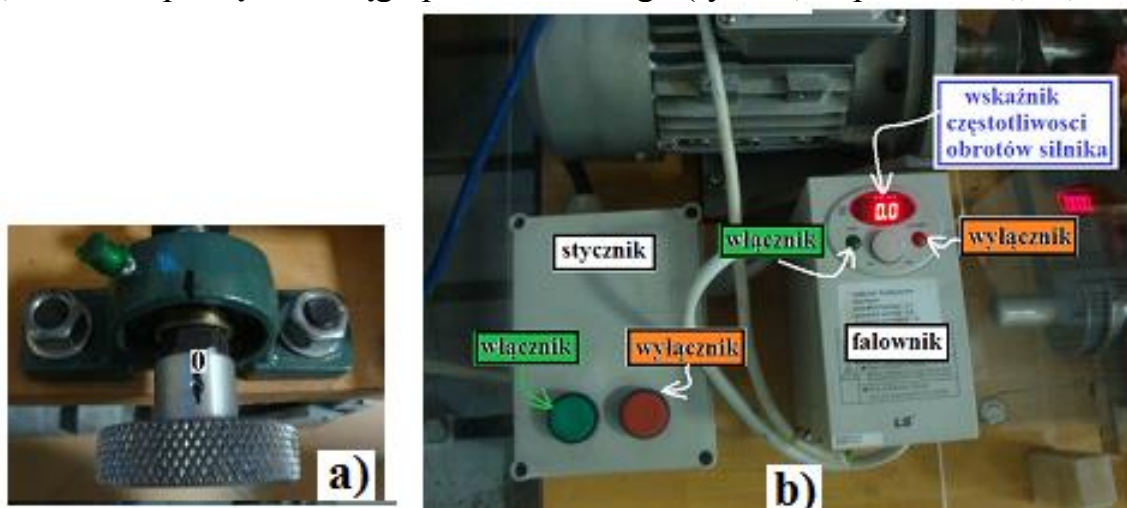


Rys.7. Stanowisko pomiarowe: Ł1, Ł2, Ł3 i Ł4 – badane łożyska; PP – przetworniki piezoelektryczne, PT – przetworniki temperatury; PW – przetwornik wiropędowy; kn - numer kanału w systemie KS-400; oznaczenia – PP k1 – przetwornik piezoelektryczny podłączony do kanału 1 systemu KS-400.



Rys.8. Miejsca zamocowania przetworników piezoelektrycznych i temperatury do łożyska.

- b) sprawdzić dokładność przykręcenia czujników piezoelektrycznych i temperatury do obudowy każdego łożyska – rys. 8;
- c) do kanału „0” analizatora podłączyć czujnik laserowy do pomiaru prędkości obrotowej wału silnika;
- d) wykonać polecenia z p. 2.2 a, c-h);
- e) wybrać: Widok→wartości RMS;
- f) wybrać: Widok→/min /max;
- g) wybrać: Widok→średnia z pomiaru;
- h) włączyć autoskalowanie –**Ctrl-A**;
- i) ustawić pokrętko naciągu paska klinowego (rys. 9a) w położeniu „0”;



Rys.9. Elementy stanowiska pomiarowego: a) pokrętko naciągu paska klinowego; stycznik i falownik.

- j) włączyć stycznik włącznikiem (rys. 9b), a następnie włączyć falownik i pokrętle regulacji częstotliwości ustawić wartość 50 Hz;
- k) włączyć pomiary - tryb pomiaru – natychmiastowy, **OK**. Jednocześnie włączyć rejestrację czasu pomiaru (użyć do tego celu stopera);
- l) po zakończeniu pomiarów zanotować czas pomiaru w tabeli 1 oraz zapisać na dysku komputera dane zarejestrowane przez KSD np.: położenie_0.sen;
- m) powtórzyć operacje z punktów k-l) zwiększając każdorazowo naciąg paska klinowego poprzez obrót pokrętła o 1/3 w kierunku ruchu wskazówek zegara;
- n) po zakończeniu ósmego (ostatniego) pomiaru wyłączyć silnik – zmniejszyć obroty silnika do zera, wyłączyć falownik i stycznik;
- o) wczytać plik z danymi dla położenia „0” pokrętła naciągu paska klinowego i uzupełnić niezbędne komórki tabeli 1;
- p) powtórzyć operację z poprzedniego punktu dla pozostałych położenia pokrętła naciągu paska klinowego.

Tabela 1. Wyniki pomiarów

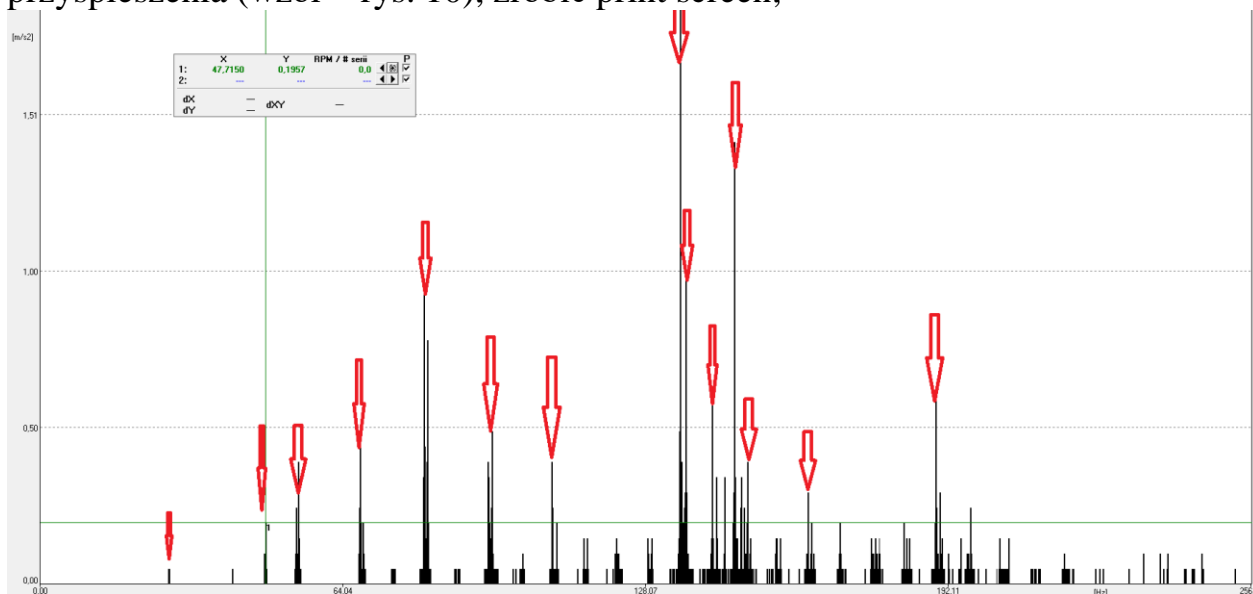
Punkt pomiaru	Rodzaj czujnika	Mierzona wielkość	Jednostki	Numer pomiaru								
				0	1	2	3	4	5	6	7	
Łożysko Ł1	PP k1	Max „a”	m/s ²									
		RMS „a”	m/s ²									
	PT k7	Temperatura	°C									
		Wsp. szczytu										
Łożysko Ł2	PP k2	Max „a”	m/s ²									
		RMS „a”	m/s ²									
	PT k8	Temperatura	°C									
		Wsp. szczytu										
Łożysko Ł3	PP k5	Max „a”	m/s ²									
		RMS „a”	m/s ²									
	PT k9	Temperatura	°C									
		Wsp. szczytu										
Łożysko Ł4	PP k6	Max „a”	m/s ²									
		RMS „a”	m/s ²									
	PT k10	Temperatura	°C									
		Wsp. szczytu										
	stoper	Czas pomiaru	min									
	PW k11	Przemieszczenie wału II	mm									

q) zanotować w tabeli 2 wyniki pomiarów łożyska wskazanego przez prowadzącego;

Tabela 2.

D	d	n	f_n	β
mm	mm	szt.	Hz	deg

r) wczytać wskazane przez prowadzącego wyniki pomiarów i uzyskać widmo przyspieszenia (wzór – rys. 10), zrobić print screen;



Rys. 10. Przykładowe widmo przyspieszenia drgań łożyska z zaznaczonymi harmonicznymi.

s) zanotować wartości harmonicznych przyspieszenia w tabeli 3;

Tabela 3.

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
f [Hz }														
a [m/s ²]														

t) obliczyć częstotliwości wg wzorów 1-4 i zaznaczyć je na uzyskanym print screenie (p. r).

W sprawozdaniu należy:

- uzupełnić tabelę 1;

- dla badanych łożysk narysować wykres a_{\max} w funkcji siły naciągu paska klinowego (wskazań przemieszczenia wału II zarejestrowanego czujnikiem wiropływowym);
- dla badanych łożysk narysować wykres a_{RMS} w funkcji siły naciągu paska klinowego
- dla badanych łożysk narysować wykres współczynnika szczytu w funkcji siły naciągu paska klinowego;
- dla badanych łożysk narysować wykres temperatury w funkcji czasu;
- przeprowadzić analizę zarejestrowanych przebiegów;
- zdiagnozować badane łożyska;
- przeanalizować zaznaczone wartości częstotliwości charakterystycznych łożyska.

4. PYTANIA KONTROLNE

1. Omówić rodzaje i budowę łożysk tocznych.
2. Wymienić i opisać przyczyny uszkodzeń łożysk tocznych.
3. Wymienić i opisać metody diagnozowania łożysk tocznych.
4. Porównać wady i zalety poszczególnych metod diagnozowania łożysk tocznych.
5. Wyznaczyć częstotliwości charakterystyczne dla zadanego typu łożyska.
6. Wymienić i opisać fazy degradacji łożysk tocznych.

5. LITERATURA

1. PREMA.: *Łożyska toczne. Informator*. Warszawa 1998.
2. Dwojak J., Rzepiela M.: *Diagnostyka i obsługa łożysk tocznych*. Biuro Gamma. Warszawa 2003.
3. Dwojak J., Rzepiela M.: *Diagnostyka drganiowa stanu maszyn i urządzeń*. Biuro Gamma. Warszawa 2005.
4. *Analizator diagnostyczny KSD-400. Instrukcja obsługi*. PUP "SENSOR" sc. Łódź. 2010.

WYMAGANIA BHP

Warunkiem przystąpienia do praktycznej realizacji ćwiczenia jest zapoznanie się z instrukcją BHP i instrukcją przeciw pożarową oraz przestrzeganie zasad w nich zawartych. Wybrane urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym mogą posiadać instrukcje stanowiskowe. Przed rozpoczęciem pracy należy zapoznać się z instrukcjami stanowiskowymi wskazanymi przez prowadzącego.

W trakcie zajęć laboratoryjnych należy przestrzegać następujących zasad.

- ♦ Sprawdzić, czy urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym są w stanie kompletnym, nie wskazującym na fizyczne uszkodzenie.
- ♦ Sprawdzić prawidłowość połączeń urządzeń.
- ♦ Załączenie napięcia do układu pomiarowego może się odbywać po wyrażeniu zgody przez prowadzącego.
- ♦ Przyrządy pomiarowe należy ustawić w sposób zapewniający stałą obserwację, bez konieczności nachylania się nad innymi elementami układu znajdującymi się pod napięciem.
- ♦ Zabronione jest dokonywanie jakichkolwiek przełączeń oraz wymiana elementów składowych stanowiska pod napięciem.
- ♦ Zmiana konfiguracji stanowiska i połączeń w badanym układzie może się odbywać wyłącznie w porozumieniu z prowadzącym zajęcia.
- ♦ W przypadku zaniku napięcia zasilającego należy niezwłocznie wyłączyć wszystkie urządzenia.
- ♦ Stwierdzone wszelkie braki w wyposażeniu stanowiska oraz nieprawidłowości w funkcjonowaniu sprzętu należy przekazywać prowadzącemu zajęcia.
- ♦ Zabrania się samodzielnego włączania, manipulowania i korzystania z urządzeń nie należących do danego ćwiczenia.
- ♦ W przypadku wystąpienia porażenia prądem elektrycznym należy niezwłocznie wyłączyć zasilanie stanowisk laboratoryjnych za pomocą wyłącznika bezpieczeństwa, dostępnego na każdej tablicy rozdzielczej w laboratorium. Przed odłączeniem napięcia nie dotykać porażonego.