

# DIAGNOSTYKA UKŁADÓW MECHATRONICZNYCH

Kierunek: I ME DU

Wykład 4

# Agenda

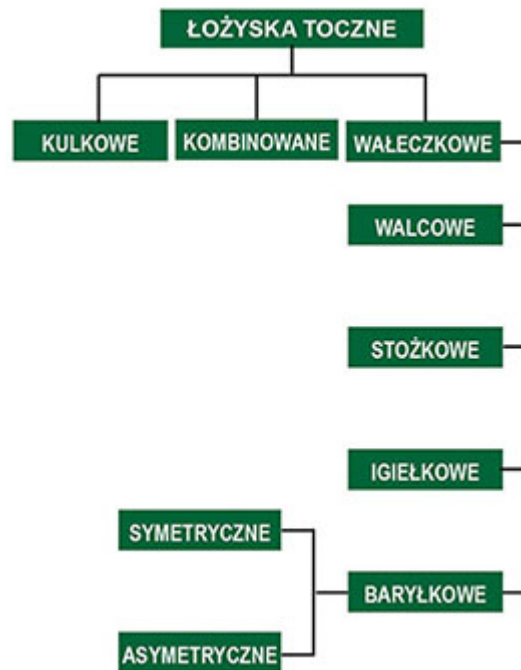
1. Informacje wprowadzające.
2. Budowa łożysk tocznych
3. Typowe uszkodzenia łożysk tocznych
  1. Uszkodzenia bieżni zewnętrznej.
  2. Wewnętrznej.
  3. Uszkodzenia elementów tocznych.
  4. Uszkodzenia koszyka.
3. Sygnały drganiowe.
4. Sygnały akustyczne.

# Informacje wprowadzające

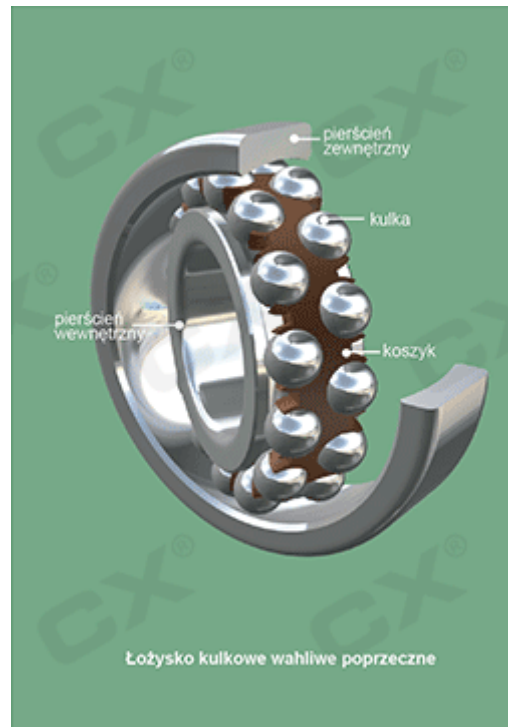
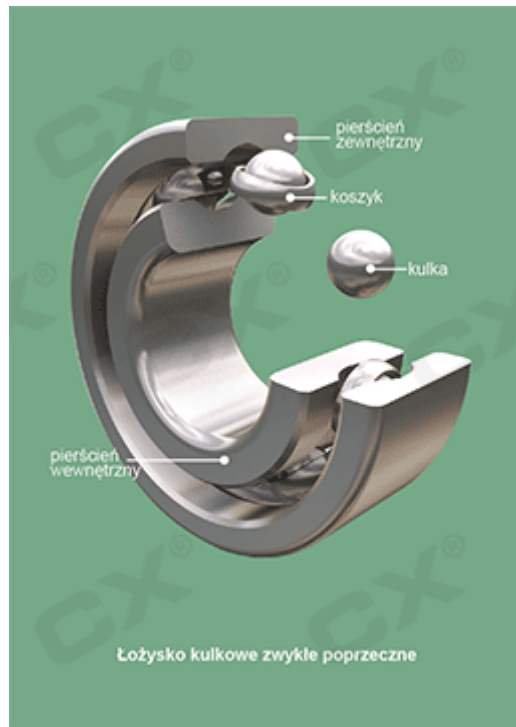
Według szacunkowych obliczeń około 80% eksploatowanych urządzeń mechanicznych zawiera łożyska toczne. Jako części różnych maszyn umożliwiają one ruch obrotowy elementów z minimalnym oddziaływaniem sił tarcia. Podstawową częścią łożyska tocznego są z całą pewnością elementy toczne. To od ich kształtu, ilości i sposobu ułożenia w dużej mierze zależą właściwości całego łożyska. Najprostsze łożysko toczne składa się z elementów tocznych ułożonych w tzw. koszyku. W łożyskach takich bieżnie dla elementów tocznych stanowią odpowiednio dopasowane części urządzenia. Jednak większość łożysk tocznych zaopatrzonych jest dodatkowo w dwa pierścienie – wewnętrzny i zewnętrzny. Oba pierścienie stanowią jednocześnie bieżnie dla elementów tocznych, a równie często, na jednym z pierścieni, prowadzony jest koszyk z tymi właśnie elementami. Spotkać też można łożyska z jednym pierścieniem, również w tym przypadku jedną z bieżni stanowi odpowiednio dopasowany element urządzenia. Oczywiście łożyska mogą składać się z większej liczby elementów np. kulkowe wzdłużne dwukierunkowe z podkładką kulistą – sześć elementów, jednak wymienione powyżej: koszyk z elementami, pierścienie wewnętrzny i zewnętrzny – występują najczęściej.

# Informacje wprowadzające

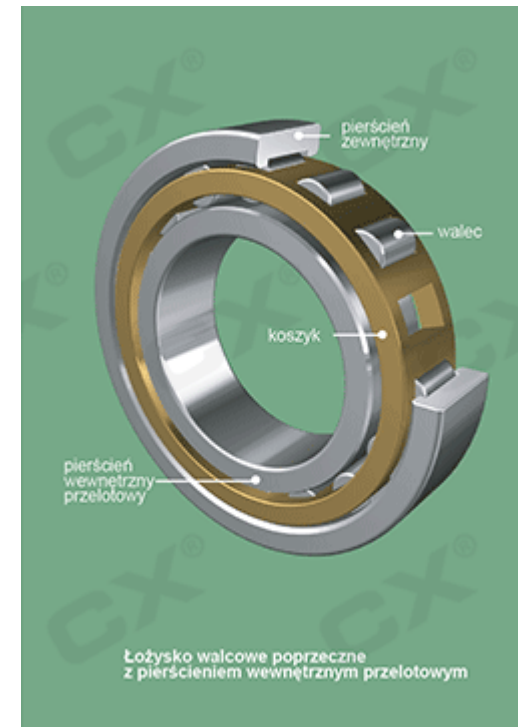
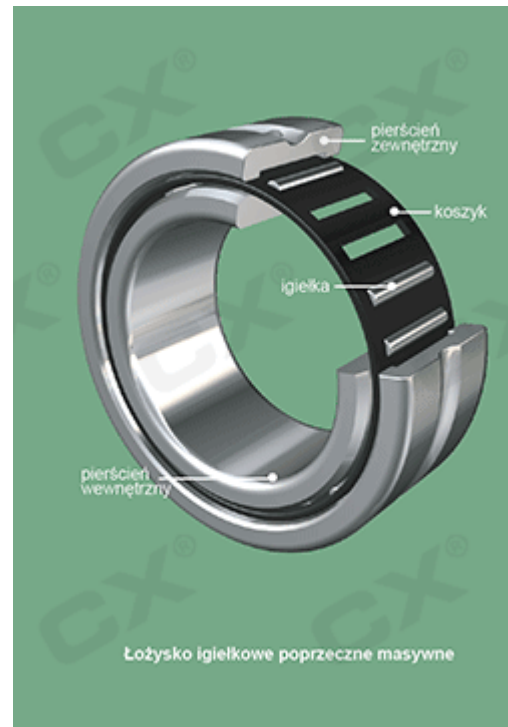
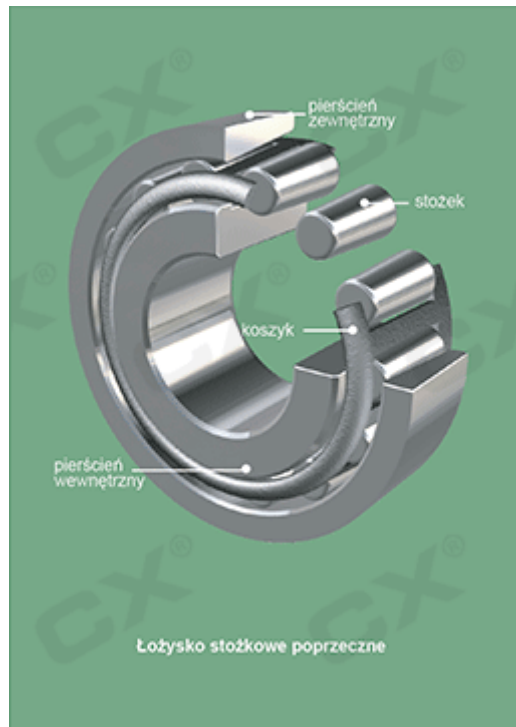
Spośród wielu istniejących podziałów łożysk tocznych najbardziej rozpowszechnionymi są: podział ze względu na kształt elementów tocznych oraz podział ze względu na preferencje łożyska co do kierunku przenoszonych obciążeń.



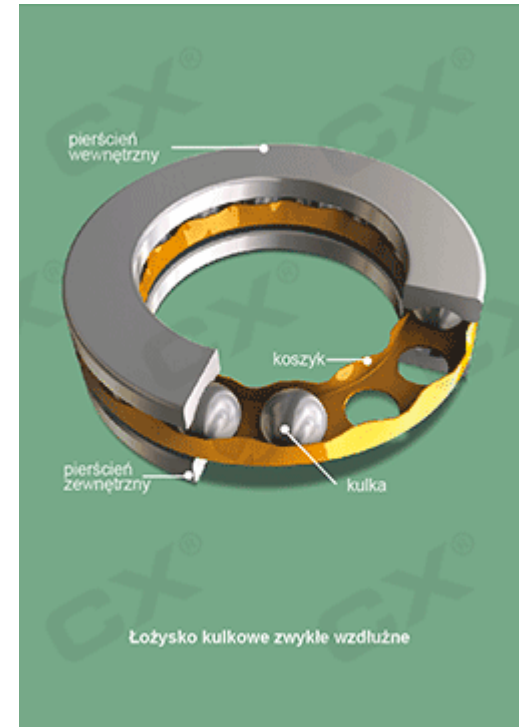
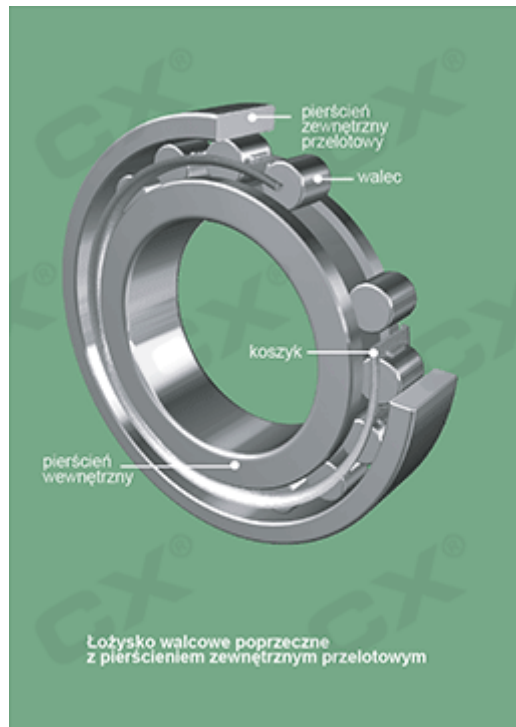
# Budowa łożysk tocznych



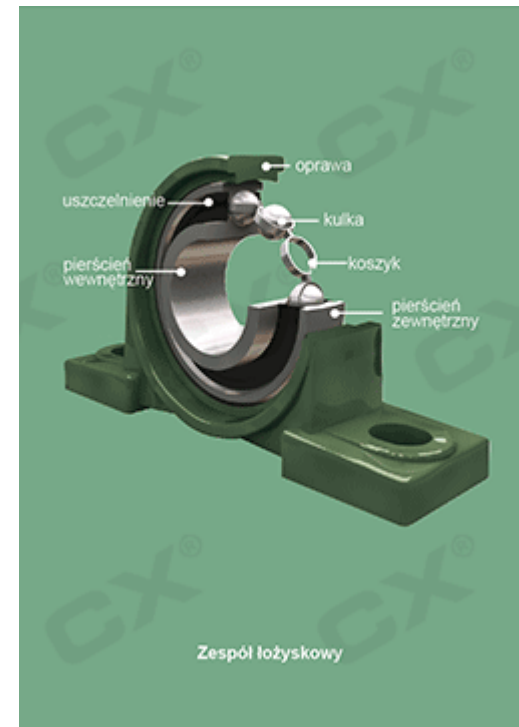
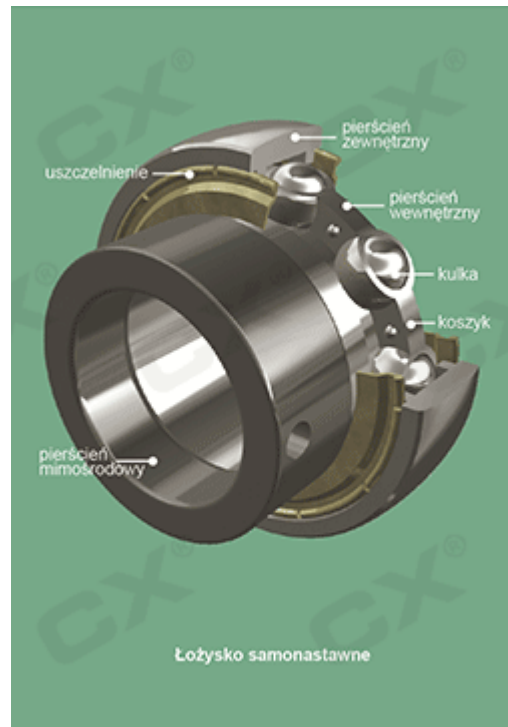
# Budowa łożysk tocznych



# Budowa łożysk tocznych



# Budowa łożysk tocznych





# Ocena stanu dynamicznego węzłów łożyskowych

W czasie eksploatacji maszyn łożyska toczne należą do najczęściej wymienianych elementów, gdyż są one najbardziej narażone na obciążenia.

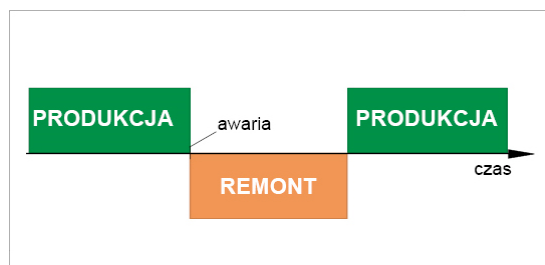
Uszkodzenia węzłów łożyskowych są najczęstszą przyczyną awarii maszyn. Defekty łożyska tocznego objawiają się zniekształceniem lub ubytkiem jego masy, co w konsekwencji prowadzi do całkowitego zniszczenia łożyska. Defekty te to korozja bieżni lub elementów tocznych, zatarcie, złuszczenie, nierówność powierzchni tocznej itp. Mogą one powstać nie tylko na skutek nadmiernego obciążenia łożysk, czy starzenia się jego elementów, ale także w wyniku niewłaściwego montażu łożyska lub jego smarowania. Dlatego układ: wał maszyny wirującej – łożysko – obudowa łożyska – konstrukcja wsporcza jest najbardziej odpowiedzialnym zespołem odzwierciedlającym stan dynamiczny maszyny.

# Ocena stanu dynamicznego węzłów łożyskowych

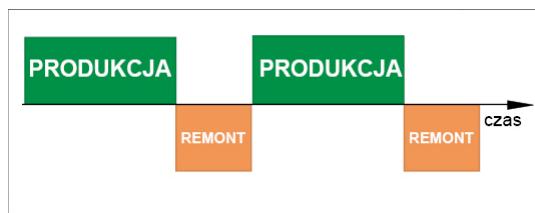
Układy nadzoru diagnostycznego maszyn ukierunkowane są na sygnały płynące z węzłów łożyskowych zespołów maszyn. Konieczne jest jak najczęstsze rozpoznawanie zmian stanu dynamicznego maszyn, stopnia zaawansowania zużycia, rodzaju i poziomu uszkodzeń po to, aby w przyszłości zapobiec ich skutkom i wcześniej podjąć odpowiednie działania zapobiegawcze.

# Ocena stanu dynamicznego węzłów łożyskowych

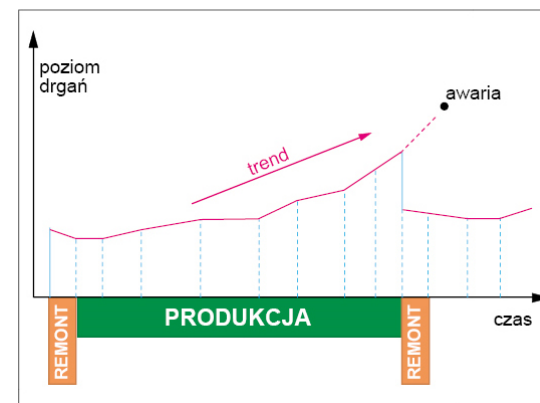
Monitorowanie stanu dynamicznego węzłów łożyskowych umożliwia prowadzenie remontów uwarunkowanych stanem technicznym maszyny i zaniechanie remontów zapobiegawczych, uwarunkowanych czasem oraz remontów poawaryjnych.



Remonty poawaryjne



Remonty zapobiegawcze uwarunkowane czasem



Remonty uwarunkowane stanem maszyny

# Ocena stanu dynamicznego węzłów łóżyskowych

Wprowadzenie remontów uwarunkowanych stanem maszyny pozwala na wyznaczenie optymalnego czasu na obsługę techniczną maszyn, co prowadzi do zaoszczędzenia wydatków na niepotrzebne przeglądy i nieprzewidziane postoje awaryjne. Obsługa techniczna maszyn oparta na dobrej znajomości ich stanu technicznego jest najtańszą metodą eksploatacji maszyn. Obsługa ta polega na tym, że:

- maszyny naprawia się wtedy, gdy wymaga tego ich stan,
- części wymienia się wtedy, gdy są nadmiernie zużyte,
- wirniki wyważa się wtedy, gdy zostanie przekroczona dopuszczalna tolerancja składowej drgań wymuszonej przez wzrastające niewyważenie,
- korekcję niewspółosiowości wałów stosuje się wtedy, gdy niewspółosiowość powoduje nadmierne obciążenia dynamiczne.

# Ocena stanu dynamicznego węzłów łożyskowych

Należy w tym miejscu podkreślić, że uszkodzenie węzłów łożyskowych maszyn niekoniecznie musi być pierwotną przyczyną złego stanu dynamicznego maszyny. Uszkodzenie łożysk pociągające za sobą awarię maszyny, może być bowiem skutkiem innych przyczyn takich jak nadmierne ich obciążenie spowodowane np. niewyważeniem wirnika, niewspółosiowością wałów połączonych sprzęgłami itp. Dlatego rozpoznaniu stanu dynamicznego węzła łożyskowego musi towarzyszyć rozpoznanie przyczyny uszkodzenia łożyska. W przeciwnym razie eksploatacja takiej maszyny będzie prowadzić do częstej wymiany łożysk.

# Ocena stanu dynamicznego węzłów łożyskowych

Najwcześniejsze rozpoznanie zmian stanu dynamicznego węzłów łożyskowych dają systemy monitorujące ich stan techniczny poprzez **pomiar drgań**. Dobrze zaprojektowana maszyna charakteryzuje się niskim poziomem drgań węzłów łożyskowych. W trakcie eksploatacji następuje zużycie maszyny, fundamenty osiadają, elementy maszyny ulegają deformacji i z czasem dochodzi do subtelnych zmian właściwości dynamicznych maszyny.

Pojawia się nadmierna niewspółosiowość wałów połączonych sprzęgłami, zużycie części, zwiększone niewyważenie elementów wirujących i zwiększenie luzów. Wszystkie te czynniki znajdują swoje odbicie we wzroście energii drgań węzłów łożyskowych. W wyniku tej sytuacji mogą być wzbudzone drgania rezonansowe i znacznie zwiększone obciążenia dynamiczne. Przyczyna oraz skutek oddziałują na siebie (**dodatnie sprzężenie zwrotne**) i maszyna nieuchronnie zmierza ku awarii.

Sygnał drganiowy niesie wiele informacji związanych ze stanem technicznym maszyn i jest podstawą do wykorzystania w systemach ciągłego monitorowania tych sygnałów jako wskaźnika stanu dynamicznego maszyny i wskaźnika potrzeby remontu. Analiza widmowa tych sygnałów pozwala na identyfikację rodzaju uszkodzenia.

# Typowe uszkodzenia łożysk tocznych

Elementy ulegające uszkodzeniom

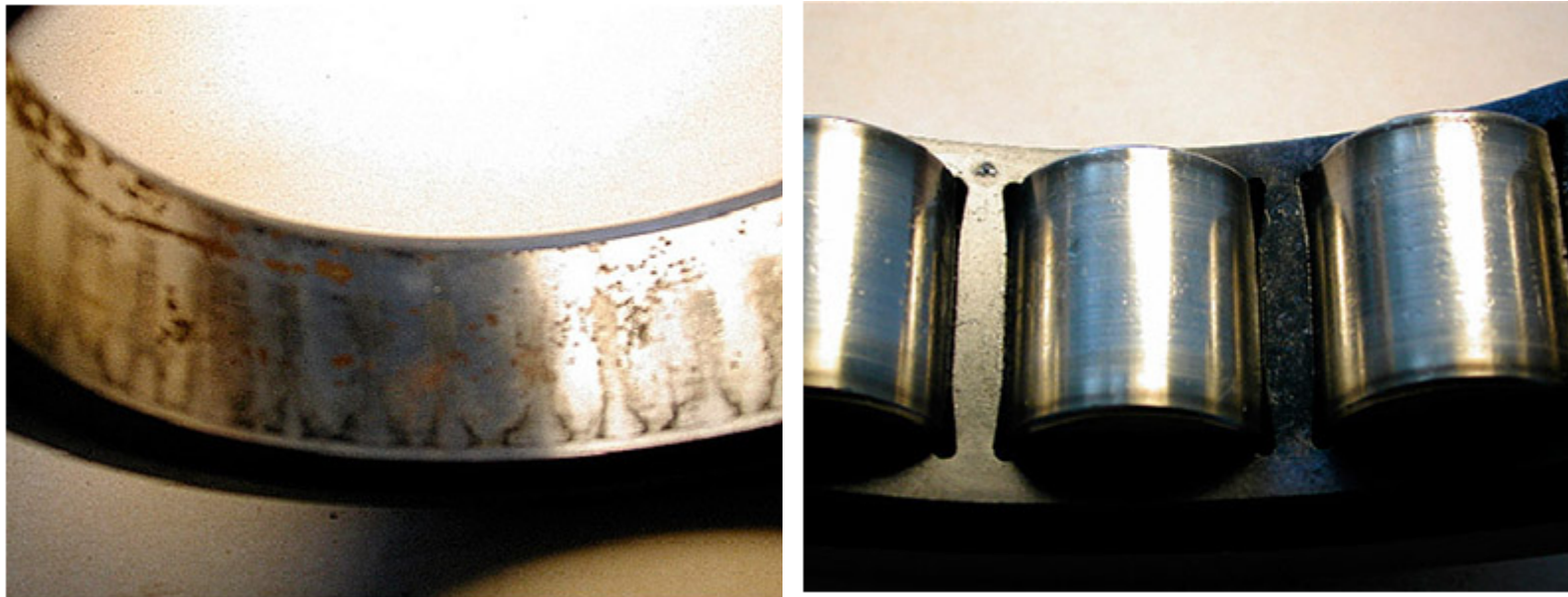
- bieżnia zewnętrzna
- bieżnia wewnętrzna
- elementy toczne
- koszyk

Główne przyczyny uszkodzenia łożyska

- niewłaściwy montaż
- błędy konstrukcyjne
- korozja
- zanieczyszczenie
- wgłębienia na bieżniach od elementów tocznych – powstałe w stanie spoczynku lub w wyniku przepływającego prądu
- niewłaściwe smarowanie



# Typowe uszkodzenia łożysk tocznych



Przegrzane elementy łożyska

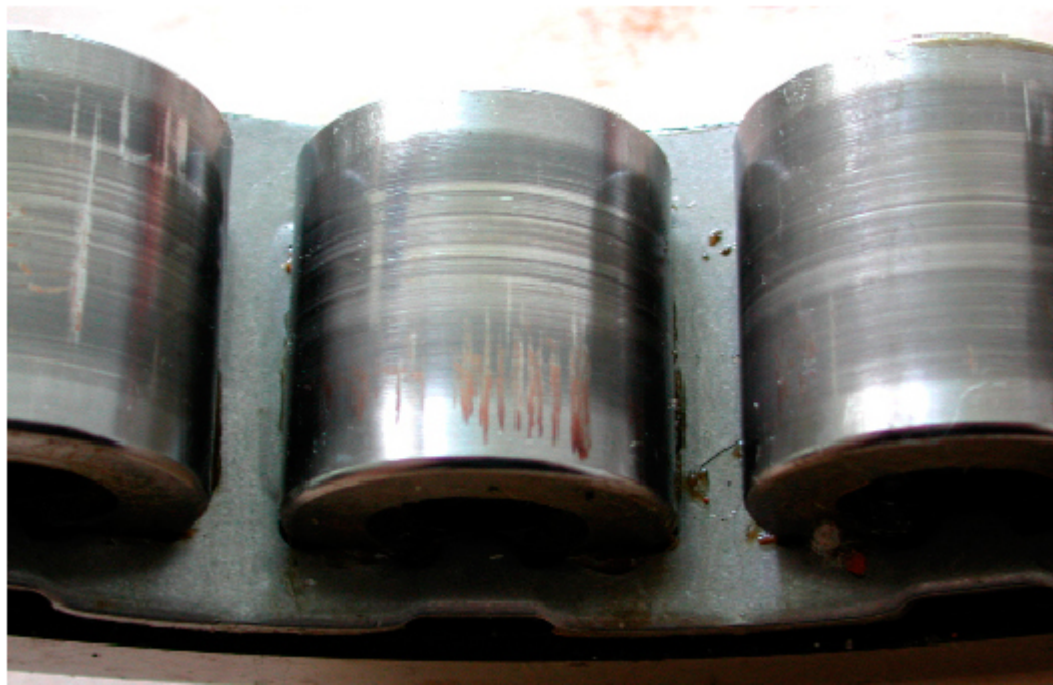


# Typowe uszkodzenia łożysk tocznych



Widoczne zmęczenie materiałów elementu łożyska

# Typowe uszkodzenia łożysk tocznych



Wgłębienia i rysy na wałeczkach mogą powstać, gdy pierścień wewnętrzny łożyska walcowego był ukośnie wciskany w pierścień zewnętrzny z wałeczkami

# Typowe uszkodzenia łożysk tocznych



Zadarcia na bieżni zewnętrznej łożyska na skutek korozji

# Typowe uszkodzenia łożysk tocznych



Wgłębienia na bieżniach pierścieni wewnętrznych łożysk

# Typowe uszkodzenia łożysk tocznych



Wgłębienia na bieżni pierścienia wewnętrznego łożyska wentylatora powstałe w wyniku przepływu prądu

# Symptomy groźnych uszkodzeń łożysk

## **Przegrzane łożysko**

Przyczynami podwyższonej temperatury pracy łożyska mogą być:

- mały luz łożyska na skutek nagrzewania się łożyska poprzez wał,
- nieodpowiedni rodzaj smaru plastycznego lub oleju w danych warunkach pracy,
- zbyt niski poziom oleju spowodowany np. jego wyciekami, lub mała ilość smaru w oprawie,
- zbyt wysoki poziom oleju,
- odkształcenie oprawy, nierówna powierzchnia podparcia,
- zbyt mały luz łożyska wskutek wydłużania się wału,
- ocieranie uszczelnienia lub odrzutników oleju o elementy nieruchome,
- zatkane kanały powrotne oleju,
- zbyt silnie dokręcona nakrętka tulei wciąganej,
- niewyważenie elementów wirujących,
- niewspółosiowe ustawienie wałów maszyn,

# Symptomy groźnych uszkodzeń łożysk

## **Przegrzane łożysko**

Przyczynami podwyższonej temperatury pracy łożyska mogą być:

- niewłaściwie umiejscowiony (przeciwnie do kierunku obrotu łożyska) regulator poziomu oleju,
- zbyt duży otwór w oprawie.

# Symptomy groźnych uszkodzeń łożysk

## **Głośnie praca łożyska**

Zmiana charakteru i poziomu hałasu wężła łożyskowego może wynikać z następujących zdarzeń:

- pojawienie się zanieczyszczeń w oprawie łożyska (brud, piasek),
- dostanie się do oprawy łożyska środków przyspieszających korozję (woda, kwas, farba itp.),
- niewystarczające smarowanie wynikające np. z nieodpowiedniego dobrania smaru lub oleju w danych warunkach roboczych łożyska,
- zbyt niski poziom oleju spowodowany np. przez wyciek środka smarnego przez uszczelnienia lub zbyt mało smaru w oprawie,
- zbyt mały luz łożyska wynikający z nagrzewania łożyska poprzez wał, zbyt duża rozszerzalność cieplna pierścienia wewnętrznego,
- odkształcenie oprawy łożyska,
- nierówna powierzchnia podparcia,



# Symptomy groźnych uszkodzeń łożysk

## Głośnie praca łożyska

Zmiana charakteru i poziomu hałasu wężła łożyskowego może wynikać z następujących zdarzeń:

- zbyt mały lub zbyt duży otwór w oprawie,
- ocieranie uszczelnień lub odrzutników oleju o elementy nieruchome,
- niewyważenie części wirujących,
- mały luz łożyska wynikający z wydłużenia się wału,
- mała średnica wału,
- tuleja wciągana nie jest wystarczająco dokręcona,
- zbyt silnie dokręcona nakrętka tulei wciąganej ,
- spłaszczenie elementów tocznych na skutek poślizgu,
- skrzywienie wału,
- drgania łożysk podczas postoju maszyny (uszkodzenie bieżni),
- odkształcenie uszczelnień łożysk,

# Symptomy groźnych uszkodzeń łożysk

## **Główna praca łożyska**

Zmiana charakteru i poziomu hałasu wężła łożyskowego może wynikać z następujących zdarzeń:

- drgania spowodowane zbyt dużym luzem roboczym łożyska,
- odkształcenie wału lub innych części łożyskowania wskutek przegrzania,
- obracanie się pierścienia zewnętrznego w powiększonym otworze oprawy.

# Symptomy groźnych uszkodzeń łożysk

## **Drgania wału łożyskowego**

Poziom drgań uszkodzonych łożysk rośnie wraz z jego zużyciem i może się radykalnie obniżyć tuż przed awarią. We wczesnych stanach degradacji łożyska drgania charakteryzują się dużymi częstotliwościami drgań (pow. 500Hz). W późniejszych stanach rośnie składowa obrotowa drgań (pierwsza harmoniczna) oraz wiele jej wielokrotności.

Podwyższony poziom drgań węzłów łożyskowych może wynikać z:

- wniknięcia do oprawy łożyska środków przyspieszających korozję (woda, kwas, farba itp.),
- zabrudzenia łożyska (brud, piasek, itp.),
- odkształcenia oprawy łożyska,
- zbyt małej średnicy wału (tuleja wciągana nie jest wystarczająco dokręcona),
- niewyważenia elementów wirujących,
- zbyt dużego otworu w oprawie łożyska,

# Symptomy groźnych uszkodzeń łożysk

## **Drgania wału łożyskowego**

Podwyższony poziom drgań węzłów łożyskowych może wynikać z:

- nierównomiernego obciążenie łożyska na skutek błędu kształtu wału i gniazda oprawy,
- skrzywienia wału,
- spłaszczenia elementów tocznych na skutek poślizgu (spowodowanego np. szybkim rozruchem),
- odkształcenia wału i pierścienia wewnętrznego,
- odkształcenia oprawy i pierścienia zewnętrznego,
- niewspółosiowości wałów maszyn,
- zbyt dużego luzu roboczego,
- obracania się pierścienia zewnętrznego w powiększonym otworze oprawy łożyskowej.

# Symptomy groźnych uszkodzeń łożysk

Większość przedstawionych powyżej przyczyn wzrostu temperatury łożyska, poziomu hałasu i drgań węzła łożyskowego utrudnia obracanie się wału maszyny, powoduje ograniczenie jej mocy i zbyt częstą wymianę łożysk.

# Drgania łożysk tocznych

W łożyskach tocznych można wyróżnić następujące źródła drgań:

- zmiana liczby elementów tocznych przenoszących obciążenie powodujące zmianę sztywności układu i generujące drgania parametryczne,
- błędy wynikające z technologii wykonania elementów łożyska (niedokładność kształtu bieżni pierścienia i elementów tocznych). Kształt tych elementów wykazuje odchylenia od kształtu okrągłego (owalność, falistość), od gładkości powierzchni (chropowatość),
- niewyważenie koszyka,
- mimośrodowość bieżni w stosunku do osi obrotu wału, luz promieniowy lub osiowy, drgania własne poszczególnych elementów łożyska.

Poziom drgań uszkodzonych łożysk rośnie wraz z jego zużyciem. Na podstawie obserwacji diagnostycznych eksploatowanych łożysk wyróżnia się kolejne fazy degradacji łożyska.

# Fazy zużycia łożysk tocznych

## Faza szumowa

Symptodem drganiowym nowego łożyska jest szerokopasmowy charakter przyspieszeń drgań, którego wartość szczytowa zawiera się w przedziale  $0,98 \text{ m/s}^2 \div 1,96 \text{ m/s}^2$ . W miarę powstawania mikrouszkodzeń pasmo drgań zawęża się w okolicy częstotliwości drgań elementów łożyska lub jego obudowy, najczęściej nieruchomej bieżni zewnętrznej ( $4 \div 10\text{kHz}$ ). Na tle tego szumu pasmowego pojawiają się wysokie impulsy, tym częstsze im więcej mikrouszkodzeń powstaje na elementach łożyska. Pod koniec fazy szumowej szczytowe przyspieszenie drgań obudowy łożyska może sięgać  $40\text{m/s}^2$  i powinno być sygnałem do planowej wymiany łożyska np. przy najbliższym postoju maszyny.

# Fazy zużycia łożysk tocznych

## Faza drganiowa

Podczas dalszej eksploatacji łożyska (nie wymienionego w końcu fazy szumowej) następują ubytki masowe w łożysku, powodujące obniżenie średniej częstotliwości drgań. Następuje znaczny wzrost wartości szczytowej przyspieszenia drgań i dalsza trwałość łożyska może wynosić od kilku godzin do kilku tygodni. Następuje powiększenie luzów łożyska, co powoduje, że wartość przyspieszenia i średnia częstotliwość drgań spada.



# Fazy zużycia łożysk tocznych

## Faza termiczna

Dalsza praca łożyska powoduje deformację jego elementów i ubytki masowe powodujące wzrost oporów ruchu. Działanie sił tarcia powoduje wydzielenie się ciepła podwyższającego temperaturę łożyska. Następuje zmiana jego własności wytrzymałościowych i łożysko zmierza ku nieuchronnej awarii.

# Fazy zużycia łożysk tocznych

Okresowa lub ciągła kontrola stanu dynamicznego węzłów łożyskowych w postaci pomiarów drgań chroni maszynę przed awarią groźną w skutki w zakresie bezpieczeństwa i strat finansowych, pozwalając na wczesne wykrycie zagrożenia i podjęcie działań zapobiegawczych. Istnieje konieczność kontroli własności dynamicznych węzłów łożyskowych w trakcie eksploatacji maszyn.

# Kontrola okresowa łożysk tocznych

Sprawdzanie łożysk tocznych w czasie eksploatacji maszyny:

- Osłuchiwanie łożyska
- Kontrola temperatury łożysk
- Obserwacja wzrokowa

Sprawdzanie łożysk tocznych w czasie postoju maszyny

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – ogólny poziom drgań

## **Pomiary ogólnego poziomu drgań węzłów łożyskowych**

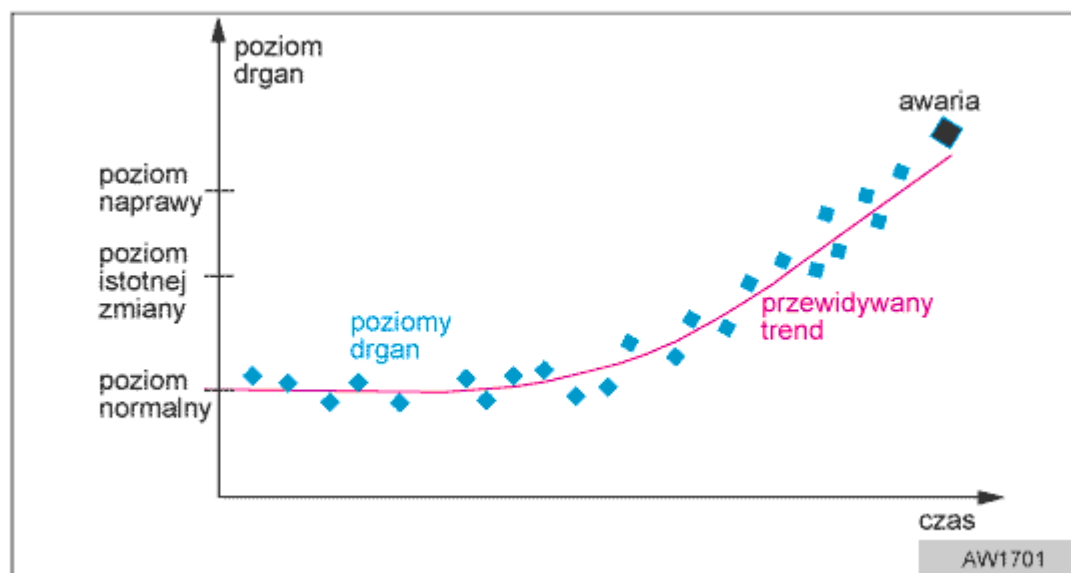
Dzisiaj pomiar drgań węzłów łożyskowych jest powszechnie i szeroko stosowany do oceny ich stanu, dlatego diagnostyka łożysk tocznych utożsamiana jest często z diagnostyką drganiową. Rozwój elektronicznego sprzętu pomiarowego i rosnąca baza informacji diagnostycznych sprawiają, że diagnostyka drganiowa jest coraz bardziej skutecznym narzędziem wykrywania defektów łożysk tocznych.

Zarejestrowane poziomy drgań węzłów łożyskowych są porównywane z wartościami granicznymi, np. podanymi przez normy międzynarodowe ISO 10816.

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – ogólny poziom drgań

## Pomiary ogólnego poziomu drgań węzłów łożyskowych

Najprostszą metodą diagnozowania łożysk są okresowe lub ciągłe pomiary szerokopasmowych poziomów drgań. Pomiary te bazują na śledzeniu trendu zmian poziomu drgań w szerokich pasmach częstotliwości (2Hz ÷ 10kHz).

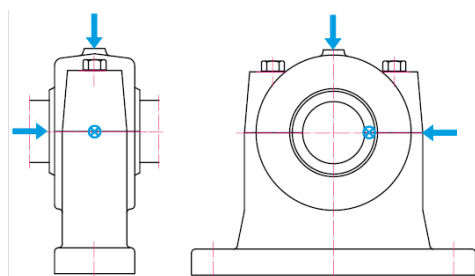


Przykładowy trend szerokopasmowego poziomu drgań

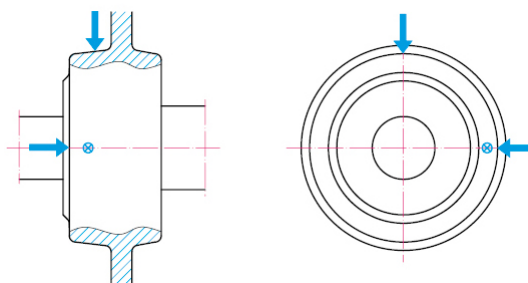
# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – ogólny poziom drgań

## Punkty pomiarowe

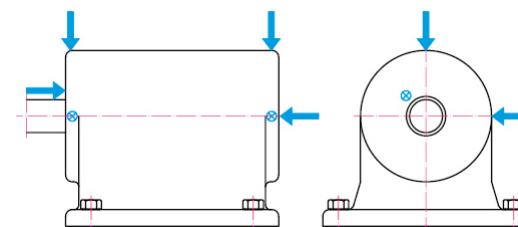
Pomiary drgań bezwzględnych łożysk wykonuje się na ich obudowach, a jeżeli to niemożliwe na tarczach łożyskowych albo na korpusie maszyny w trzech prostopadłych kierunkach: w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału w kierunku poziomym i pionowym oraz wzdłuż osi wału na wysokości osi, możliwie jak najbliżej wału.



Rozmieszczenie punktów pomiarowych na łożyskach wolnostojących



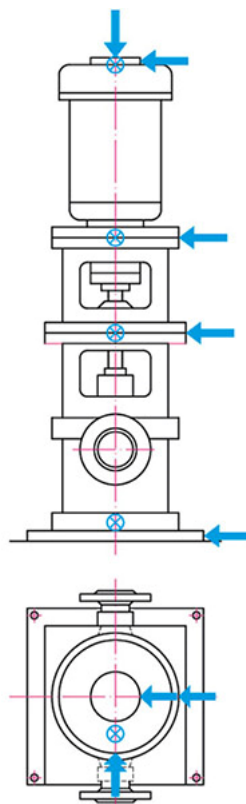
Rozmieszczenie punktów pomiarowych na łożyskach w obudowach



Rozmieszczenie punktów pomiarowych na korpusie maszyny

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – ogólny poziom drgań

Punkty pomiarowe



Rozmieszczenie punktów pomiarowych dla maszyny z wirnikiem pionowym

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – ogólny poziom drgań

## **Dobór i mocowanie czujnika drgań**

Możliwe jest stosowanie piezoelektrycznych czujników przyspieszeń drgań w szerokim zakresie częstotliwości. Zaleca się by aparatura była wyposażona w układ całkujący. Sygnał wyjściowy takiego przetwornika jest proporcjonalny do przyspieszeń drgań. Dla zakresu częstotliwości od ok. 10Hz do ok. 1,5 kHz można stosować elektrodynamiczny czujnik prędkości drgań, którego sygnał wyjściowy jest proporcjonalny do prędkości drgań w przypadku elektronicznej korekcji charakterystyki dynamicznej czujnika.

Należy zadbać o to, aby mocowanie przetwornika na powierzchni maszyny było zgodne z instrukcją producenta czujnika tak, by nie zakłócał on warunków pomiarów drgań badanej maszyny. Jest istotne, aby docisk i masa czujnika nie miały znaczącego wpływu na drgania maszyny.

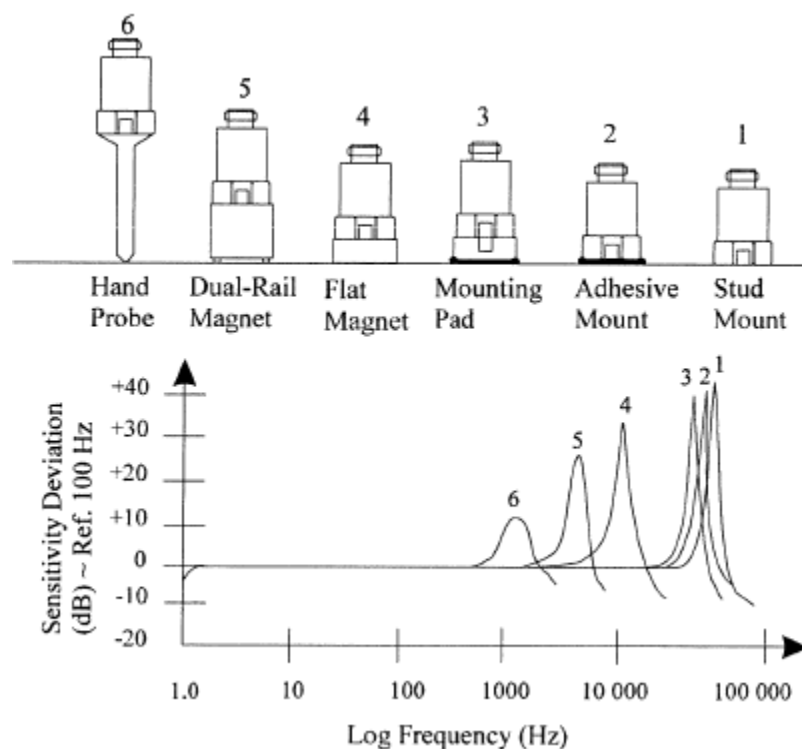


# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – ogólny poziom drgań

## Dobór i mocowanie czujnika drgań

Czujniki mogą być mocowane:

- przez docisk ręczny,
- za pomocą magnesu,
- przez przyklejenie,
- za pomocą wkręta.



Sposoby mocowania czujników zostały wymienione w kolejności szerokości pasma przenoszenia drgań. Najszersze pasmo przenoszenia występuje dla połączenia gwintowego.

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – ogólny poziom drgań

## **Strefy stanu dynamicznego maszyn**

Według normy międzynarodowej ISO 10816 i ISO 7919 przyjmuje się cztery strefy oceny maszyn :

**A** – drgania nowo oddanych do eksploatacji maszyn powinny znajdować się w tej strefie (stan dobry),

**B** – maszyny, których drgania zaliczono do tej strefy mogą pracować długotrwale bez ograniczeń (stan dopuszczalny),

**C** – maszyny, których drgania znajdują się w tej strefie uważa się zwykle za nie nadające się do długotrwałej pracy ciągłej. Na ogół maszyna może pracować przez ograniczony okres czasu, aż będzie możliwość podjęcia działań zapobiegawczych (stan jeszcze dopuszczalny),

**D** – wartości drgań w tej strefie są zazwyczaj uważane za wystarczająco poważne i wskazują na możliwość wystąpienia uszkodzenia maszyny. Po osiągnięciu takiego poziomu drgań maszynę należy wyłączyć (stan niedopuszczalny).

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – ogólny poziom drgań

## Wartości graniczne poziomu drgań maszyn

Norma ISO 10816 dzieli maszyny na cztery grupy stosownie do typu maszyny, mocy znamionowej lub wzniosu osi wału:

**Grupa 1:** wielkie maszyny o mocy znamionowej ponad 300kW; maszyny elektryczne o wzniosie osi wału  $H \geq 315\text{mm}$ , (maszyny te mają zazwyczaj łożyska ślizgowe, zakres prędkości obrotowych rozciąga się od 120obr/min do 15 000obr/min),

**Grupa 2:** maszyny średniej mocy znamionowej powyżej 15kW aż do 300kW włącznie; maszyny elektryczne o wzniosie osi wału  $160\text{mm} \leq H < 315\text{mm}$  (maszyny te mają zazwyczaj łożyska toczne i prędkości obrotowe powyżej 600obr/min),

**Grupa 3:** pompy z wirnikami wielołopatkowymi i z oddzielnym napędem (odśrodkowe, o mieszanym przepływie lub o przepływie poosiowym) o mocy znamionowej powyżej 15kW (maszyny tej grupy mogą mieć łożyska ślizgowe lub łożyska toczne),

**Grupa 4:** Pompy z wirnikami wielołopatkowymi i z wbudowanym napędem (odśrodkowe, o mieszanym przepływie i o przepływie poosiowym) o mocy znamionowej powyżej 15kW (maszyny tej grupy mogą mieć łożyska ślizgowe lub łożyska toczne).

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – ogólny poziom drgań

## Wartości graniczne poziomu drgań maszyn wg normy ISO 10816

### Grupa 1

Klasa podpory	Granice strefy	Prędkość drgań, wartość skuteczna [mm/s]	Przemieszczenie drgań, wartość skuteczna [ $\mu\text{m}$ ]
Elastyczna	A/B	3,5	45
	B/C	7,1	90
	C/D	11	140
Sztymbna	A/B	2,3	29
	B/C	4,5	57
	C/D	7,1	90

### Grupa 2

Klasa podpory	Granice strefy	Prędkość drgań, wartość skuteczna [mm/s]	Przemieszczenie drgań, wartość skuteczna [ $\mu\text{m}$ ]
Elastyczna	A/B	2,3	37
	B/C	4,5	71
	C/D	7,1	113
Sztymbna	A/B	1,4	22
	B/C	2,8	45
	C/D	4,5	71

### Grupa 3

Klasa podpory	Granice strefy	Prędkość drgań, wartość skuteczna [mm/s]	Przemieszczenie drgań, wartość skuteczna [ $\mu\text{m}$ ]
Elastyczna	A/B	3,5	28
	B/C	7,1	56
	C/D	11	90
Sztymbna	A/B	2,3	18
	B/C	4,5	36
	C/D	7,1	56

### Grupa 4

Klasa podpory	Granice strefy	Prędkość drgań, wartość skuteczna [mm/s]	Przemieszczenie drgań, wartość skuteczna [ $\mu\text{m}$ ]
Elastyczna	A/B	2,3	18
	B/C	4,5	36
	C/D	7,1	56
Sztymbna	A/B	1,4	11
	B/C	2,8	22
	C/D	4,5	36

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – ogólny poziom drgań

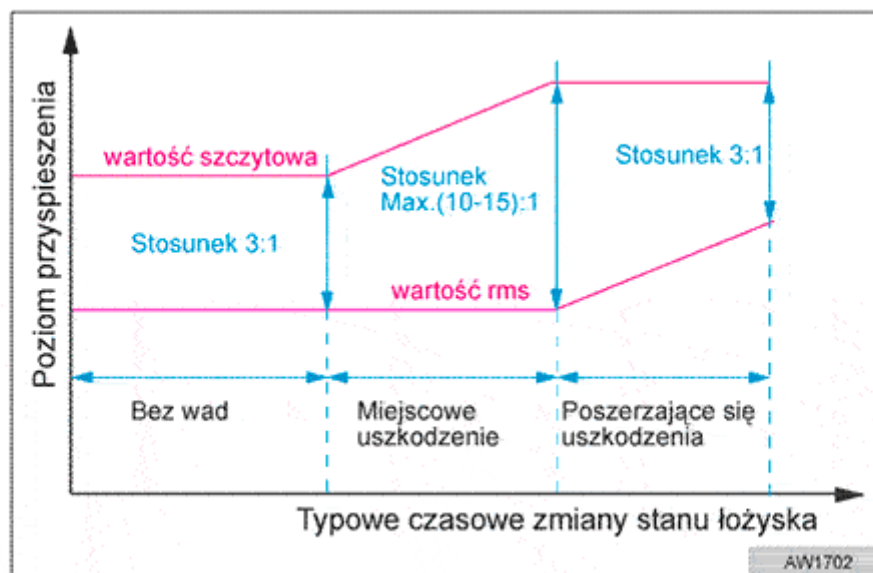
Diagnostyka drganiowa oparta na rejestracji szerokopasmowych poziomów drgań węzłów łożyskowych polega na ocenie trendu zmian poziomów drgań. Przyjmuje się, że wzrost poziomu drgań 2,5 razy (8dB) jest zmianą istotną pozwalającą na klasyfikację maszyny do wyższej klasy stanu technicznego. Wzrost poziomu drgań więcej niż 10 razy (20dB), prowadzi do zmiany klasyfikacji stanu technicznego maszyny z dobrego na niedopuszczalny. Ponieważ uszkodzone łożyska toczne generują drgania szerokopasmowe, dla wykrycia defektów w bardzo wczesnej fazie, zaleca się pomiar przyspieszeń drgań. Można rejestrować wartości skuteczne i wartości szczytowe w celu ich porównania.

Kryteria ISO są stosowane zarówno do maszyn eksploatowanych, odbieranych od producenta, po montażu czy też po remoncie. Jednak oprócz pierwszego przypadku wymagany jest stan dynamiczny przynajmniej dobry jeżeli producent nie stawia wyższych wymagań.

**Przedstawiona metoda ocenia stan dynamiczny łożyska, ale nie określa przyczyny zmiany stanu. Dlatego pomiar ogólnych poziomów drgań węzłów łożyskowych zalecany jest jako pierwszy etap diagnostyki drganiowej.**

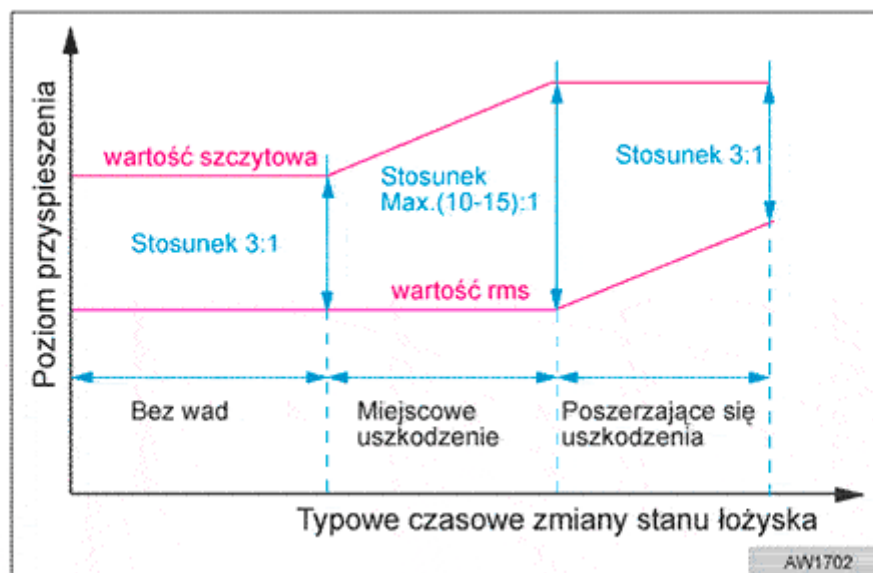
# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – współczynnik szczytu

Współczynnik szczytu jest stosunkiem wartości szczytowej sygnału drganiowego do jego wartości skutecznej w danym przedziale częstotliwości drgań. Wartość współczynnika szczytu może być estymatą stanu łożyska tocznego.



# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – współczynnik szczytu

Najczęściej metoda ta opiera się na pomiarach przyspieszenia drgań i podobnie jak w metodzie poprzedniej istotna jest zmiana współczynnika szczytu w czasie eksploatacji maszyny. Pomiar wykonuje się przyrządem pomiarowym, który ma możliwość wyznaczenia rzeczywistej wartości skutecznej i rzeczywistej wartości szczytowej.



Wzrost współczynnika szczytu wskazuje na pogorszenie stanu łożyska tocznego. Należy wziąć pod uwagę fakt, że w ostatniej fazie uszkodzenia wartość współczynnika szczytu może maleć

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – współczynnik szczytu

Przedstawiona metoda oceny stanu łożyska tocznego poprzez rejestrację współczynnika szczytu podobnie jak poprzednia ocenia stan łożyska, ale nie lokalizuje przyczyny zmiany stanu. Zaletą jej jest szybki, prosty i łatwy w obsłudze pomiar (pod warunkiem, że dysponujemy odpowiednim przyrządem pomiarowym).

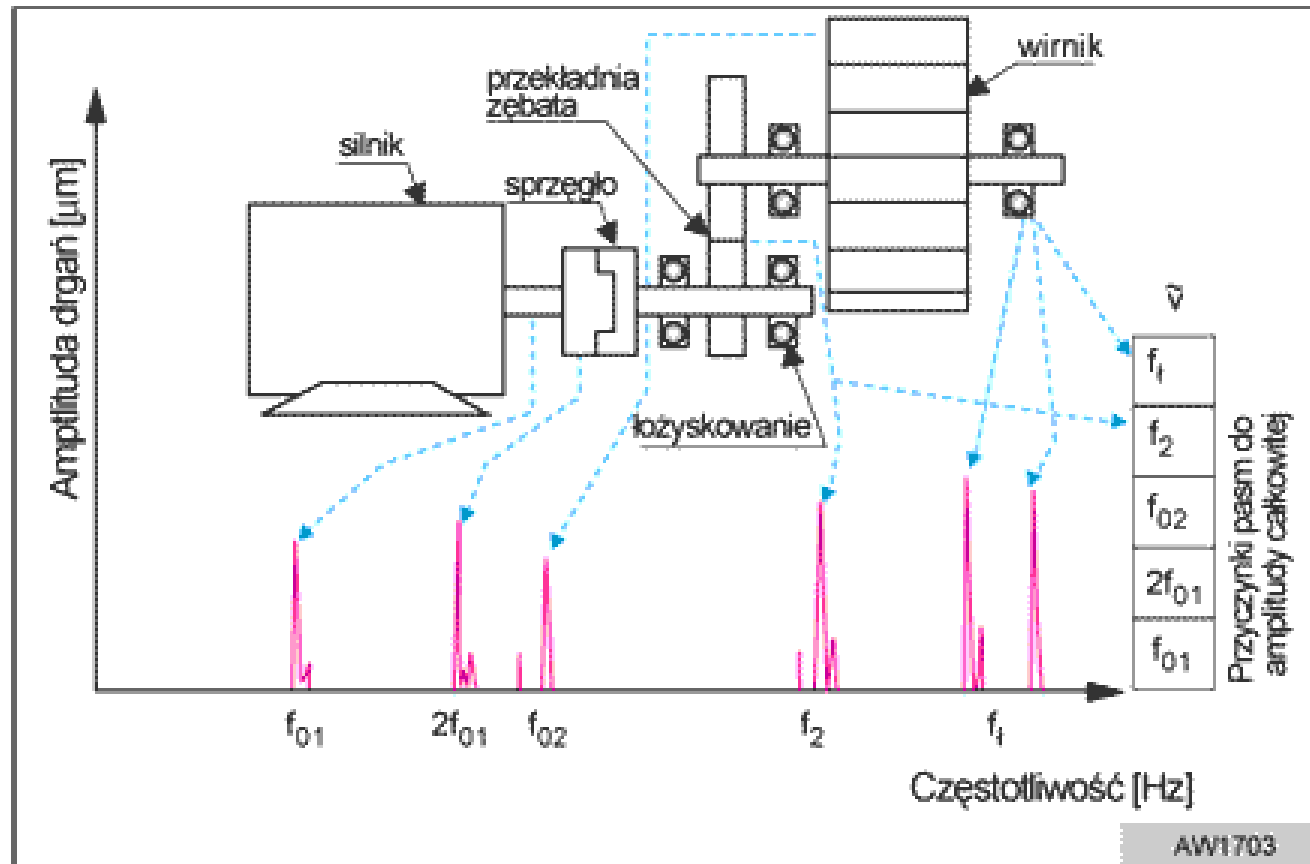
Skuteczność metody maleje, gdy w pobliżu badanego węzła łożyskowego występują inne źródła sygnałów impulsowych.



# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – widmo drgań

Badania stałe lub okresowe ogólnego poziomu drgań dają jedynie informację o ogólnym stanie technicznym węzła łożyskowego, a nie o stanie poszczególnych jego elementów. W celu zbadania przyczyn złego stanu dynamicznego i stopnia zaawansowania poszczególnych uszkodzeń badanej maszyny, należy prowadzić analizę częstotliwościową jej drgań. Analiza częstotliwościowa (widmowa) rozkłada sygnał drganiowy na składowe o różnych częstotliwościach. Wzrost poziomów składowych, oraz ich częstotliwości dostarczają informacji, które części maszyny ulegają usterkom. Usterki takie jak np. niewyważenie wirnika, niewspółosiowość wałów maszyn, defekty łożysk, uszkodzenie zęba koła zębatego, itp. są w trakcie pomiarów odzwierciedlone w postaci charakterystycznych składowych harmonicznym. Śledzenie wartości składowych harmonicznym sygnału drganiowego w funkcji czasu w kolejnych pomiarach okresowych umożliwia identyfikację i kontrolę danego uszkodzenia.

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – widmo drgań



# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – obwiednia drgań

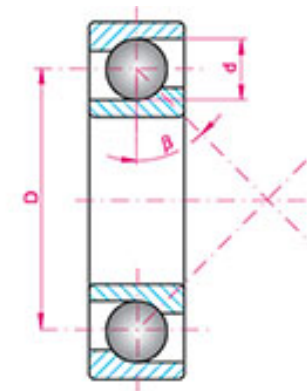
Analiza obwiedni sygnału polega na tym, że sygnał drganiowy wychodzący z czujnika po wstępnej filtracji wykorzystującej rezonans własny czujnika podlega demodulacji, a następnie wyznaczane jest widmo powstałej obwiedni sygnału. Tak wyznaczone widmo obwiedni sygnału drganiowego może zawierać składowe o częstotliwościach drgań odpowiadających defektom elementów łożyska.

Przedstawiona metoda polega na specyficznej analizie drgań rezonansowych maszyny. Krótkotrwałe impulsy – udary widoczne w przebiegach czasowych sygnału drganiowego węzłów łożyskowych mogą być spowodowane uszkodzeniem elementu tocznego koszyka lub przejściem elementu tocznego przez punktowe uszkodzenie bieżni łożyska. Znając geometrię łożyska, liczbę elementów tocznych i prędkość obrotową bieżni wewnętrznej względem bieżni zewnętrznej, można wyznaczyć charakterystyczne częstotliwości składowych harmonicznym sygnału dla poszczególnych elementów łożyska (przy założeniu, że toczenie elementów łożyska odbywa się bez poślizgów).

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – obwiednia drgań

Częstotliwości odpowiadające defektom elementów łożyska tocznego można obliczyć w oparciu o zależności:

- element toczny:  $f_0 = \frac{1}{2} f_n \frac{D}{d} \{1 - (d/D \cos\beta)^2\}$
- bieżnia wewnętrzna:  $f_w = \frac{1}{2} n f_n \{1 + d/D \cos\beta\}$
- bieżnia zewnętrzna:  $f_z = \frac{1}{2} n f_n \{1 - d/D \cos\beta\}$
- koszyk:  $f_k = \frac{1}{2} f_n \{1 - d/D \cos\beta\}$



gdzie:  $d$  – średnica elementu tocznego,  $D$  – średnica podziałowa łożyska,  $\beta$  – kąt pracy łożyska,  $n$  – liczba elementów tocznych,  $f_n$  – częstotliwość obrotów pierścieniem zewnętrznym względem pierścienia wewnętrznego.

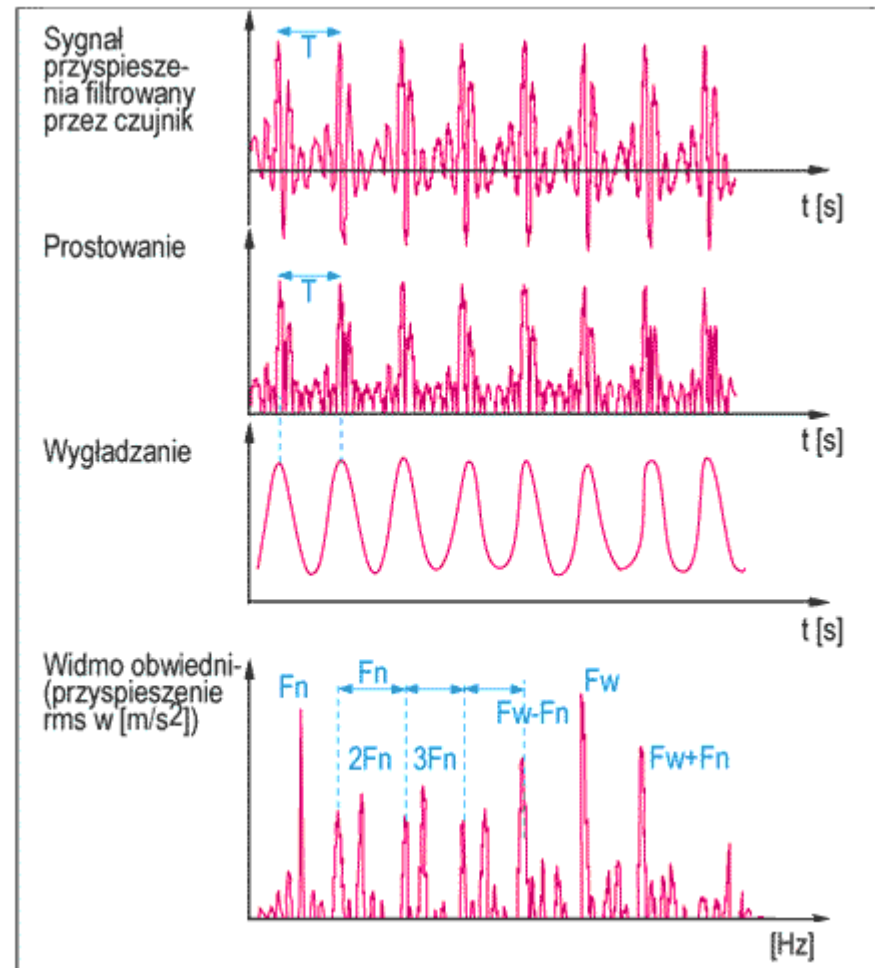
# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – obwiednia drgań

Obliczenie tych częstotliwości jest pierwszym etapem diagnozowania węzłów łożyskowych. Znając częstotliwości odpowiadające lokalnym defektom elementów czynnych badanego łożyska wykonujemy pomiary i analizę drgań łożyska w punkcie, gdzie łożysko jest najintensywniej obciążone (np. dolna obudowa łożyska), wykorzystując w tym celu piezoelektryczny czujnik drgań.

W metodzie tej sygnał drganiowy węzła łożyskowego jest prostowany i wygładzany w celu uzyskania obwiedni sygnału, która zawiera niskoczęstotliwościowe modulacje odpowiadające cyklicznie pojawiającym się impulsom udarowym, wynikającym z ewentualnego uszkodzenia łożysk.

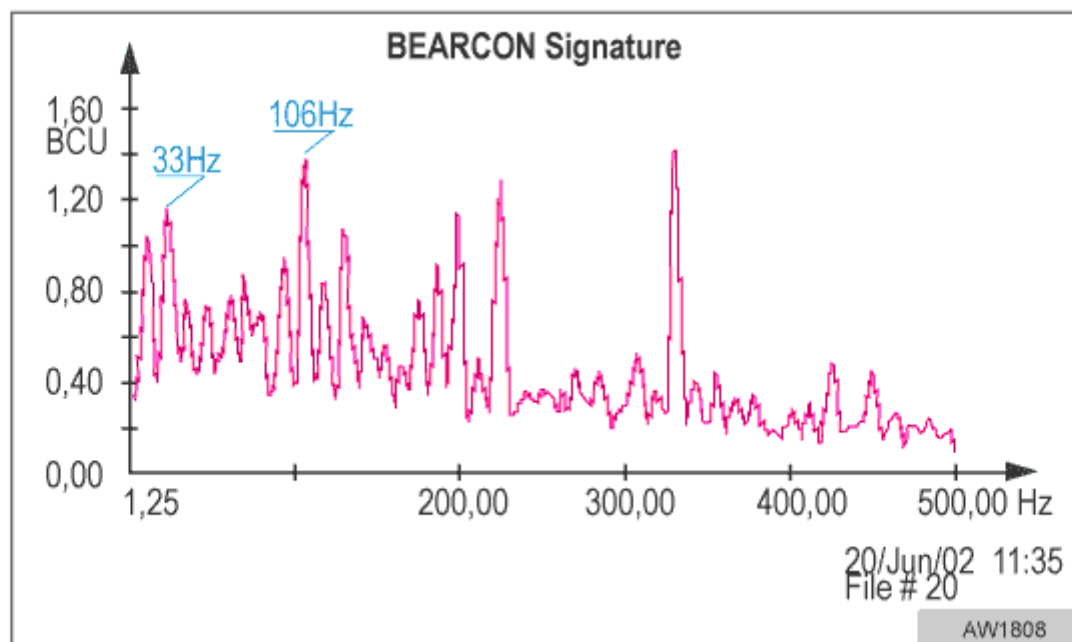
W ostatniej fazie pomiaru wykonuje się analizę widmową obwiedni sygnału, zazwyczaj w zakresie do 500Hz. Z tak otrzymanego widma można dokładnie określić częstotliwości dominujących składowych harmonicznym i porównać je z wcześniej wyznaczonymi.

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – obwiednia drgań



# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – obwiednia drgań

Poniżej przedstawiono zarejestrowaną analizę obwiedni dla uszkodzonego łożyska pompy. Odnajdziemy na nim składowe harmoniczne o wyznaczonych częstotliwościach oraz ich wielokrotnościach.



# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – obwiednia drgań

Zastosowanie analizy widmowej w połączeniu z analizą obwiedni pozwala precyzyjnie oddzielić informacje o uszkodzonym łożysku tocznym od zakłóceń zewnętrznych i daje możliwość precyzyjnego śledzenia rozwoju uszkodzenia łożysk.



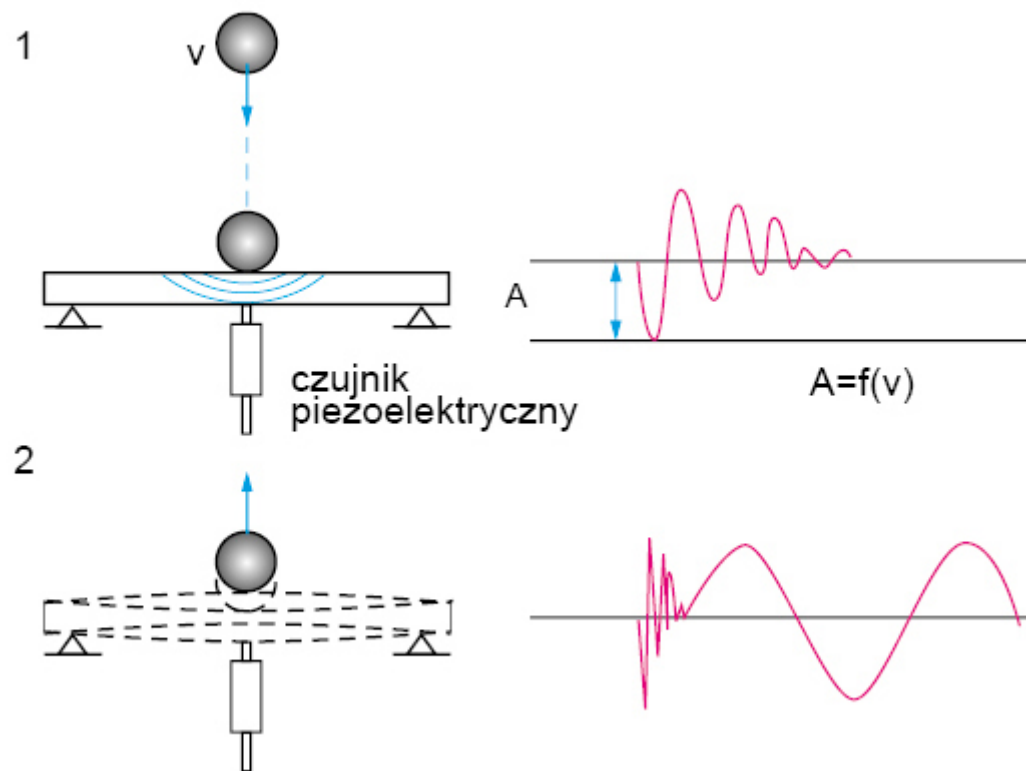
# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – metoda SPM

Pod koniec lat 60-tych opatentowano metodę SPM (ang. Shock Puls Method) do diagnostyki łożysk tocznych, polegającą na detekcji i pomiarze impulsów uderowych w obszarze rezonansowym czujnika drgań (ok. 32kHz). Metoda ta wykrywa i analizuje rozwój mechanicznej fali uderowej wywołanej przez zderzenia dwóch mas.

Impulsy uderzeniowe tworzą fale ciśnieniowe generowane podczas pracy łożysk tocznych na styku elementów tocznych i bieżni. Proces ten można omówić na przykładzie z rysunku.

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – metoda SPM

Początkowo, gdy kulka stalowa uderza o stalowy pręt, w materiale obu elementów wytwarza się fala ciśnieniowa. Amplituda fali jest funkcją prędkości zderzenia. W następnej fazie zderzenia materiał kulki i pręta ulega ugięciu i oba elementy wpadają w drgania.



Proces powstawania impulsów uderzeniowych

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – metoda SPM

W metodzie SPM przy zastosowaniu czujnika piezoelektrycznego informacje o fali ciśnieniowej, (ale nie drganiowej) gromadzone są i przetwarzane na sygnał analogowy impulsów elektrycznych.

Impulsy uderzeniowe generowane w łożysku mają wiele źródeł pochodzenia i występują w różnych częstotliwościach. Przypadkowe i rzadkie zderzenie pomiędzy chropowatościami powierzchni w łożyskach tworzy impulsy uderzeniowe o niskim poziomie. Średnia wartości częstotliwości występowania impulsów jest rzędu kHz. Warstwa smarna na powierzchniach tocznych łożyska znacznie obniża prędkości uderzeniowe generowane przez strukturę o regularnej powierzchni. Uderzenia wywołane tradycyjnymi drobinami (złuszczenie lub wykruszenie) wytwarzają przypadkowe, rzadkie impulsy uderzeniowe o większej wartości bezwzględnej i niższej częstotliwości. Rzadkie impulsy uderzeniowe występujące w nieregularnych odstępach powstają pod wpływem odcisków twardych drobin na obciążonych powierzchniach łożysk.

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – metoda SPM

Wyraźne uszkodzenia łożysk (kratery, pęknięcia bieżni) generują początkowo impulsy uderzeniowe w regularnych odstępach. Wraz z narastaniem uszkodzenia regularność ta rozmywa się. Tego typu uszkodzenia wytwarzają impulsy o nieregularnych odstępach i zmiennych wartościach bezwzględnych.

Mikroprocesor przyrządu SPM do diagnostyki łożysk tocznych analizuje sygnał, a po wprowadzeniu danych wejściowych (typ łożyska, prędkość obrotowa) ocenia stan łożyska i opisuje wraz z podaniem stanu smarowania oraz zaawansowania ewentualnego uszkodzenia.

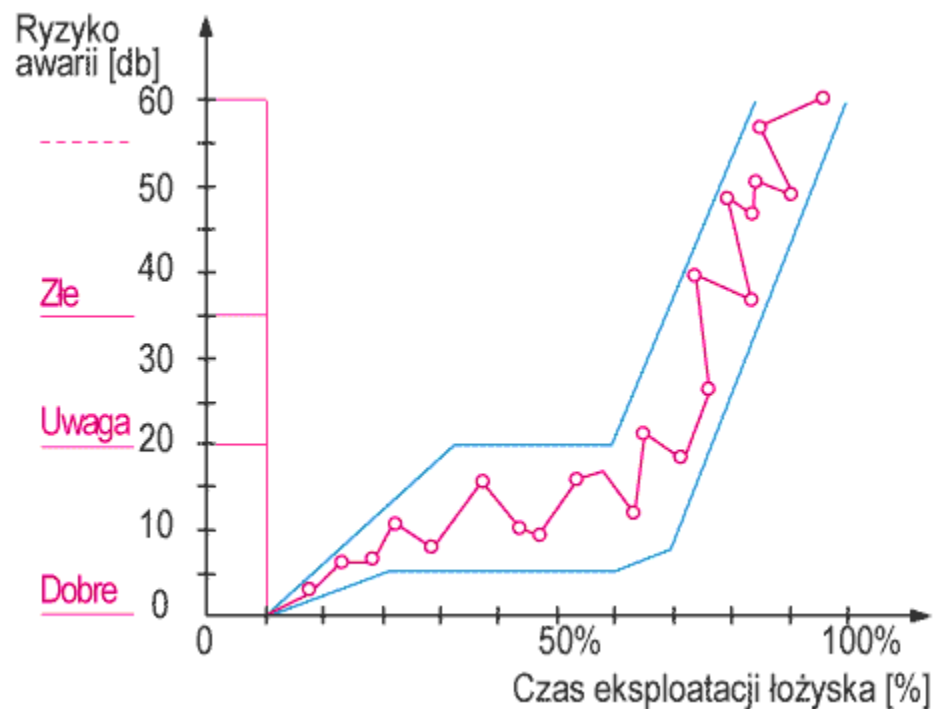
W metodzie SPM doświadczalnie ustalono skalę oceny jakości łożysk tocznych uwzględniającą wielkość łożyska i prędkość obrotową wału. Doświadczalnie również określono poziom prędkości uderzeń DU (ze względu na związek prędkości z energią uderzenia) łożyska pracującego poprawnie jako:

$$v_n = \beta n d \gamma$$

gdzie:  $n$  - prędkość obrotowa wału [obr/min],  $d$  - średnica wewnętrzna łożyska [mm],  $\beta$ ,  $\gamma$  - współczynniki ustalone doświadczalnie.

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – metoda SPM

Ocena stanu łożyska polega tu na porównaniu aktualnie zmierzonego poziomu prędkości uderzeń z poziomem określonym dla łożyska pracującego poprawnie. Wyrażony w decybelach stosunek tych poziomów zawiera informację o stanie łożyska.



Rozwój uszkodzeń w łożysku obserwowany na podstawie pomiaru poziomu impulsów udarowych

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – metoda SPM

Należy pamiętać, że odczyt pomiarów prowadzonych w obszarze drgań rezonansowych czujnika jest silnie uzależniony od sposobu jego mocowania i lokalizacji.

# Diagnostyka drganiowa stanu łożysk tocznych – podsumowanie

Orientacyjny przegląd możliwych źródeł drgań węzłów łożyskowych

PRZYCZYNY	CZĘSTOTLIWOŚĆ	MOŻLIWOŚCI USUNIĘCIA
Niewyważenie	$f$ wimika	Wyważenie
Nieprawidłowe ustawienie	$f$ wimika $2 \times f$ wimika $4 \times f$ wimika	Wyosiowanie wałów
Błąd przekładni	$z \times f$ wimika ( $z$ =ilość zębów)	Sprawdzenie kół zębatych
Uszkodzone łożyska toczne	różne częstotliwości	Wymiana łożysk tocznych
Uszkodzone pasy napędowe	$f$ pasa $2 \times f$ pasa	Zastosowanie pasów bezskokowych
Zakłócenia elektromagnetyczne	$f$ wimika $f$ synchroniczne $2 \times f$ synchroniczne	Usunięcie w większości przypadków nie jest możliwe
Masy wirujące z mechanizmem korbowym	$f$ suwu $2 \times f$ suwu $4 \times f$ suwu itd.	Drgania pierwszego rzędu można zredukować poprzez wyważenia Drgania wyższego rzędu wyeliminować poprzez zmiany konstrukcyjne