

Prof. dr hab. inż. Sławomir Szymaniec,  
Katedra Elektrowni, Diagnostyki i Inżynierii Komputerowej, Politechnika Opolska

# Organizacja eksploatacji i diagnostyki w przemyśle i energetyce - cz. 1

Od ponad 30 lat autor zajmuje się eksploatacją i diagnostyką maszyn w krajowym przemyśle i energetyce. Analizuje stan i stopień zużycia maszyn i urządzeń, statystyki i przyczyny uszkodzeń oraz stopień zaawansowania diagnostyki maszyn - głównie w krajowych cementowniach, zakładach remontowych maszyn elektrycznych, maszyn przepływowych, elektrowniach, elektrociepłowniach i ciepłowniach. W początkowym okresie obserwacji i analizy autor stwierdził dużą ilość awarii zespołów maszynowych, które niosły za sobą duże straty finansowe. W przedsiębiorstwach prowadzona była eksploatacja planowo-zapobiegawcza, uwarunkowana okresem eksploatacji maszyny, a określenie przyczyny awarii miało miejsce zazwyczaj w czasie przeglądu poawaryjnego.

Organizacja diagnostyki maszyn w przedsiębiorstwach była i bardzo często jeszcze jest niejednolita. Powoduje to dezorganizację i uniemożliwia skuteczny, szybki przepływ informacji o stanie maszyn.

Analizując szczegółowo przyczyny awarii i nieoczekiwanych, nieplanowanych postojów zespołów maszynowych, w oparciu o własne doświadczenia i obserwacje, autor ustalił listę przyczyn.

Z wieloletnich badań autora w przemyśle i energetyce wynika, że standar-

dowe procedury diagnostyki (zalecenia norm krajowych i międzynarodowych, zalecenia producentów, dokumentacje techniczno-ruchowe maszyn, monitoring ogólnego poziomu drgań) nie wystarczą do wczesnego i bezpiecznego rozpoznania i identyfikacji źródła uszkodzeń maszyn. Należy w zależności od rodzaju przyczyn uszkodzeń stosować różne metodyki badań. W związku z powyższym, autor zaproponował nową technologię i organizację diagnozowania eksploatowanych maszyn.

Prezentowana technologia diagnozowania polega głównie na:

Podziale maszyn w przedsiębiorstwie wg grup o różnej ważności: maszyny krytyczne, maszyny quasi-krytyczne i pomocnicze. Te pierwsze są nadzorowane za pomocą systemów ciągłego monitorowania i zabezpieczeń. Maszyny quasi-krytyczne są monitorowane okresowo i mogą posiadać system zabezpieczeń. Maszyny pomocnicze są monitorowane okresowo, głównie przy pomocy przenośnego sprzętu pomiarowego.

Wprowadzeniu jednolitego systemu akwizycji danych diagnostycznych dla wymienionych powyżej grup maszyn.

Włączeniu do systemu wszystkich pomiarów maszyn realizowanych na okoliczność oceny jej stanu technicznego.

Opracowaniu i praktycznej weryfikacji:

- warunków prawidłowej eksploatacji maszyn w przedsiębiorstwie,
- procedury pomiarowej dla maszyn o różnej ważności,
- kryteriów oceny i wartości granicznych stanu dynamicznego maszyn,
- uszkodzeń maszyn i metod ich rozpoznawania.

Opracowana metoda diagnostyki zespołów maszynowych ujmująca zadania eksploatacji, zabezpieczenia i zarządzania maszynami w przemyśle i energetyce pozwala zmniejszyć ilość awarii, rozsądnie zaplanować remonty, co w efekcie przełoży się na zmniejszenie kosztów eksploatacji.

Współcześnie, w okresie stale rosnących wymagań wobec wydajności oraz redukcji kosztów w przemyśle i energetyce, koniecznością staje się właściwa eksploatacja i diagnostyka maszyn. Często uszkodzenia niewielkich elementów napędowych skutkują znacznymi stratami wynikającymi z nieprzewidzianego zatrzymania procesu produkcyjnego oraz nieplanowych prac remontowych. Diagnostyka maszyn oraz monitorowanie parametrów ich pracy pozwala uniknąć skutków awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów maszyn oraz znacznie wydłużyć czas eksploatacji maszyn [9, 10, 16].

Maszyny przemysłowe tworzą coraz to bardziej złożone zespoły, towarzyszy temu coraz intensywniejsza produkcja przemysłowa i eksploatacja maszyn, często przez 24 godziny na dobę, czyli w ruchu ciągłym. Podstawowym zadaniem stawianym przed inżynierami jest ciągłe poprawianie wydajności maszyn. Wzrostowi wydajności powinno towarzyszyć zwiększenie starań o zapewnienie pełnej sprawności urządzeń, szczególnie że trzeba to pogodzić ze stale malejącą

liczebnością personelu odpowiedzialnego za utrzymanie ruchu i serwis maszyn. Wzrastająca wartość maszyn i urządzeń w przemyśle kieruje uwagę służb utrzymania ruchu i służb eksploatacyjnych na unowocześnianie zasad eksploatacji i serwisu maszyn [1÷10 i 13÷16].

Bezpieczeństwo eksploatacji, dyspozycyjność oraz trwałość i niezawodność maszyn i urządzeń wykorzystywanych w procesie produkcyjnym ma decydujący wpływ na kondycję ekonomiczną przedsiębiorstwa [1÷10, 13÷16]. Znaczne straty produkcyjne mogą być skutkiem nieprzewidzianych awarii lub postępu maszyn i urządzeń - do tego dochodzą często bardzo kosztowne naprawy. Konieczne jest dysponowanie bieżącymi informacjami o zmianach stanu dynamicznego maszyn, stopniu ich zużycia, rodzaju i poziomie uszkodzeń - wszystko po to, aby zapobiec nieprzewidzianym awariom i w miarę możliwości wcześniej podjąć odpowiednie działania zapobiegawcze. Prowadzenie eksploatacji maszyn w oparciu o ich obserwację przez obsługę jest niewystarczające, natomiast diagnostyka oraz monitorowanie para-

metrów ich pracy pozwala uniknąć awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów oraz znacznie wydłużyć czas eksploatacji maszyn. Organizacyjna i finansowa atrakcyjność diagnostyki zespołów maszynowych oraz ciągły postęp w elektronice i dostępność do niej, zachęcają do intensywnego stosowania diagnostyki maszyn.

## ■ Eksploatacja maszyn w przemyśle i energetyce

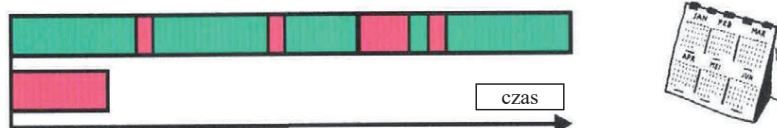
W ujęciu ogólnym zespoły maszynowe można eksploatować na różne sposoby, zatem wyróżnić możemy eksploatację [16]: do wystąpienia awarii, planowo-zapobiegawczą, zależną od stanu maszyn oraz eksploatację, łączącą cechy dwóch ostatnich.

Takie ujęcie zagadnienia eksploatacji maszyn określa jednocześnie metody ich remontów. Wyróżnia się w związku z tym remont [16]:

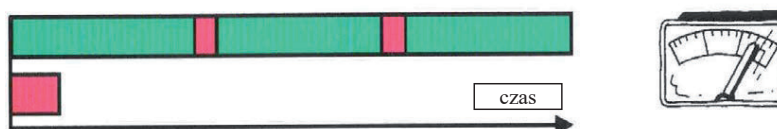
- poawaryjny,
- zapobiegawczy uwarunkowany okresem eksploatacji,
- uwarunkowany stanem technicznym,



Rys. 1. Eksploatacja do wystąpienia awarii, relacja pomiędzy czasem eksploatacji (produkcji) - kolor zielony i czasem awarii (postoju) - kolor czerwony [13]



Rys. 2. Eksploatacja planowo-zapobiegawcza, relacja pomiędzy czasem eksploatacji (produkcji) - kolor zielony i czasem awarii (postoju) - kolor czerwony [13]



Rys. 3. Eksploatacja zależna od stanu maszyny, relacja pomiędzy czasem eksploatacji (produkcji) - kolor zielony i czasem awarii (postoju) - kolor czerwony [13]

- uwarunkowany okresem eksploatacji i stanem maszyny.

Eksploatację maszyn typu „do wystąpienia awarii” prowadzi się najczęściej w zakładach, w których procesy technologiczne obsługują napędy z dużą liczbą silników małej i średniej mocy (stosunkowo niedrogich maszyn), a każdy ważny proces technologiczny jest dodatkowo zabezpieczony silnikami zapasowymi. Silniki przy takim rodzaju eksploatacji pracują do momentu wystąpienia awarii, a straty w produkcji są wtedy stosunkowo niewielkie, bo silniki zapasowe zastępują te uszkodzone. Jeżeli jednak duże silniki nie mające rezerwy pracują aż do awarii to straty mogą być znaczne, a nawet wielokrotnie przewyższyć koszt nowego silnika i zakładowi może grozić długotrwały postój. Dlatego też ważne jest, aby wiedzieć które części maszyny są podatne na uszkodzenia oraz kiedy awaria może nastąpić. Posiadając takie informacje, można bardziej racjonalnie zaplanować remont. W ujęciu ogólnym, relację pomiędzy czasem eksploatacji (produkcji) i czasem awarii (postoju) dla „eksploatacji do wystąpienia awarii” przedstawiono na rys. 1.

Planowo-zapobiegawcza eksploatacja maszyn prowadzona jest najczęściej w zakładach, w których nie wszystkie ważne napędy mają swoich dublerów lub tam, gdzie nieplanowane zatrzymanie produkcji może powodować bardzo duże straty ekonomiczne i społeczne. Produkcję w takich zakładach zatrzymuje się w ściśle określonych terminach (np. raz w roku) i prowadzi remont zapobiegawczy. W ujęciu ogólnym relację pomiędzy czasem eksploatacji (produkcji) i czasem awarii (postoju) dla „eksploatacji planowo-zapobiegawczej”, przedstawiono na rys. 2.

Wskaźnik awaryjności wielu maszyn nie zmniejsza się w wyniku wymiany określonych części (np. łożysk, uszczelnień, łańcuchów, itd.). Jak pokazuje praktyka przemysłowa, bardzo często po przeprowadzeniu takich napraw, przynajmniej przez jakiś czas awaryjność maszyn wzrasta (dzięki niefortunnej ingerencji remontowca w maszyny). Po-

gorszenie się stanu technicznego danej maszyny jest kwestią indywidualną i nie da się sztywno określić dla wszystkich maszyn długości czasu ich bezawaryjnej eksploatacji. Okresy międzyremontowe są często określane statystycznie jako takie, podczas których oczekuje się, że nie więcej niż np. 2% maszyn nowych (lub w pełni wyremontowanych) ulegnie awarii [16]. W eksploatacji planowo-zapobiegawczej bardzo często oddaje się do remontu maszyny, które tego remontu nie wymagają. Remont zapobiegawczy maszyn przy eksploatacji planowo-zapobiegawczej jest bardzo często technicznie i ekonomicznie nieuzasadniony. W metodzie eksploatacji maszyn zależnej od ich stanu technicznego każda maszyna traktowana jest w sposób indywidualny [16]. W ujęciu ogólnym, relację pomiędzy czasem produkcji i czasem postoju dla eksploatacji zależnej od stanu maszyny, przedstawiono na rys. 3. Czas remontów nie jest z góry sztywno zaplanowany, tylko uwarunkowany stanem technicznym danej maszyny. Remont maszyny przeprowadza się tylko wtedy, gdy jest on konieczny. Wcześniej, systematycznie wykonuje się pomiary diagnostyczne maszyn, określa się ich stan techniczny, indywidualnie dla każdej maszyny. Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić początek pojawienia się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój, określać trend zmian. Przykładowo mogą to być łożyska maszyny (rys. 4). Ocenę aktywności drganiowej maszyny można wykonać w oparciu o obowiązujące normy lub w oparciu o sprawdzone i zalecane kryteria [16]. Wyniki pomiarów drgań można ekstrapolować w celu przewidzenia terminu koniecznego zatrzymania maszyny, w tym przypadku ze względu na uszkodzenie łożyska. Analizując wyniki pomiarów, obok określenia terminu koniecznego zatrzymania ze względu na stan techniczny, można określić zakres remontu, przewidzieć i zaplanować z wyprzedzeniem czasowym stronę techniczną oraz ekonomiczną remontu.

Eksploatacja maszyn zależna od ich stanu technicznego jest strategią prowa-

żenia eksploatacji maszyn technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą, coraz częściej stosowaną w krajowych zakładach przemysłowych. W gospodarce krajów o dużej kulturze technicznej jest strategią dominującą. Strategia ta, obok korzyści ekonomicznych typu: wydłużenie okresów międzyremontowych, zwiększenie niezawodności maszyn, zwiększenie wydajności, eliminacja niepotrzebnych wymian podzespołów, skrócenie czasu napraw, zmniejszenie kosztów magazynowych, wymusza stały postęp techniczny zwłaszcza w obszarze podnoszenia poziomu wiedzy przez kadrę techniczną. Nieuchronne są przy tym koszty na organizację i utrzymanie na dobrym poziomie służb diagnostycznych [1÷10, 13÷16]. Korzyści ekonomiczne z prowadzenia diagnostyki technicznej w danym zakładzie, jak dowodzi praktyka przemysłowa [1÷10, 13÷16], wyraźnie przewyższają koszty jej stosowania.

Autor stwierdza, że w krajowych zakładach przemysłowych przed przejściem z eksploatacji planowo-zapobiegawczej do eksploatacji zależnej od stanu maszyn bardzo często stosuje się formę pośrednią będącą połączeniem elementów wymienionych rodzajów eksploatacji: planowo-zapobiegawczej i zależnej od stanu maszyn.

Aby zmniejszyć awaryjność zespołów maszynowych w przedsiębiorstwach, ustalono warunki konieczne, jakich należy bezwzględnie przestrzegać dla zapewnienia należytego utrzymania ruchu zespołów maszynowych. Są to [9, 10, 16]:

- udział zespołu diagnostycznego w odbiorach nowych maszyn,
- kompleksowe sprawdzenie silników w Stacji Prób przed oddaniem ich do eksploatacji (oczywiście stacja musi być wyposażona we właściwe wyposażenie badawcze),
- prawidłowy dobór silnika do wymagań napędzanego urządzenia oraz możliwości zasilania,
- prawidłowy dobór łożysk w napędzie i w maszynie napędzanej,
- prawidłowy dobór sprzęgła,



Rys. 4. Wynik pomiaru drgań węzła łożyskowego przykładowego silnika w napędzie przemysłowym, idea diagnostyki drganiowej stanu technicznego łożyska tocznego w silniku [13, 14]

- właściwie zaprojektowana i wykonana konstrukcja wsporcza, fundament z elementami do mocowania silnika i maszyny napędzanej, dbałość o ich stan techniczny,
- napędy prawidłowo ustawione na konstrukcji wsporczej, fundamencie,
- ustawienie wszystkich maszyn z uwzględnieniem poprawek cieplnych,
- wyważenie wszystkich wirników z uwzględnieniem niewyważenia cieplnego,
- prawidłowe wyważenie wirnika zespołu: silnik + sprzęgło + maszyna napędzana,
- stosowanie właściwej techniki smarowania łożysk w zespole maszyn,
- dbałość o dobry stan izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych,
- stosowanie pomiaru temperatury tam, gdzie jest to konieczne,
- przestrzeganie zasad montażu i demontażu łożysk - podgrzewanie indukcyjne,
- przeprowadzanie remontów tylko wtedy; gdy stan techniczny maszyny wskazuje na jego konieczność. Nie powinno się ingerować w sprawnie działającą maszynę. Zalecana jest strategia utrzymania maszyny polegająca na eksploatacji zależnej od ich stanu technicznego. Powyższe uwarunkowania mają jednakową wagę.

### ■ Diagnostyka eksploatacyjna zespołów maszynowych w przemyśle i energetyce

Najprostszą i najstarszą metodą diagnozowania maszyn wirujących pod względem mechanicznym są okresowe lub ciągłe pomiary szerokopasmowych poziomów drgań, które bazują na śledzeniu trendu zmian poziomu prędkości (głównie w Europie) lub przyspieszenia drgań (głównie w Ameryce, rzadziej w Europie) w szerokim paśmie częstotliwości, obejmującym zakres widma częstotliwościowego maszyny. Zakres częstotliwości zależy od rodzaju maszyny [16]. Zakres niezbędny do oceny maszyny z łożyskami tocznymi powinien zawierać częstotliwości wyższe niż w przypadku maszyny z łożyskami ślizgowymi. Dla silników WN częstotliwości żłobkowe znajdują się powyżej 1 kHz. Oznacza to, że zakres pomiarowy powinien obejmować co najmniej pasmo 10 Hz ÷ 2,0 kHz [11, 12, 16]. Dla maszyn wolnoobrotowych zalecana jest dolna granica częstotliwości na poziomie 2 Hz [16]. Autor zwraca uwagę na istotną różnicę w stosunku do poprzednich wymagań normowych: w przeszłości intensywność drgań wyznaczała wartość skuteczną prędkości drgań mierzoną w paśmie od 10 Hz do 1 kHz.

Wielkości otrzymane z pomiarów w szerokim paśmie częstotliwości, obejmującym zakres widma częstotliwościowego maszyny są porównywane z dopuszczalnymi granicznymi poziomami wibracji określonymi w normie ISO 10816 [11] oraz normie ISO 7919 [12] i na tej podstawie maszyna jest oceniana a następnie podejmowana jest decyzja o dalszej eksploatacji lub zatrzymaniu danej maszyny. Według normy ISO 10816 dla oceny stanu technicznego maszyny należy wykonać pomiary wartości skutecznej prędkości drgań w ustalonym zakresie częstotliwości -  $V_{RMS}$  w punktach przedstawionych na rys. 5 i rys. 6 oraz porównać wyniki ze wskazaniami norm. Natężenie drgań maszyny to największa ze zmierzonych wartości  $V_{RMS}$  w punktach pomiarowych.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}, \quad (1)$$

gdzie:  $V_{RMS}$  - wartość skuteczna prędkości drgań w określonym przedziale częstotliwości,

T - przedział czasu dla którego określa się  $V_{RMS}$ , czas całkowania,  $v(t)$  - prędkość drgań, sygnał prędkości drgań.

Bezwzględne wartości  $V_{RMS}$  podane przez normy nie zawsze są trafne zważywszy na: indywidualne cechy poszczególnych maszyn, impedancję mechaniczną w punkcie pomiaru,

niemniej są one ogólnie użyteczne. Wskazują bowiem na ważność wzrostu poziomu drgań w różnym stopniu dla różnych maszyn. Norma ISO 10816 (rys. 9) stwierdza, iż wzrost wartości  $V_{RMS}$  2,5-krotny (o 8 dB) jest zmianą istotną, ponieważ pokrywa jedną klasę jakości. Wzrost  $V_{RMS}$  10 razy (o 20 dB) lub więcej jest poważny, ponieważ może zmienić klasyfikację maszyny - „dobry stan techniczny” na „nie dopuszczalny stan techniczny”. W praktyce diagnostycznej wykonujemy pomiary drgań na obudowie łożysk lub na tarczach łożyskowych w obszarze największej sztywności albo na korpusie maszyny w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (X, Y, Z) w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału w kierunku poziomym i pionowym oraz wzdłuż osi wału na wysokości osi, możliwie jak najbliżej wału. Ilustruje to rys. 7 i rys. 8.

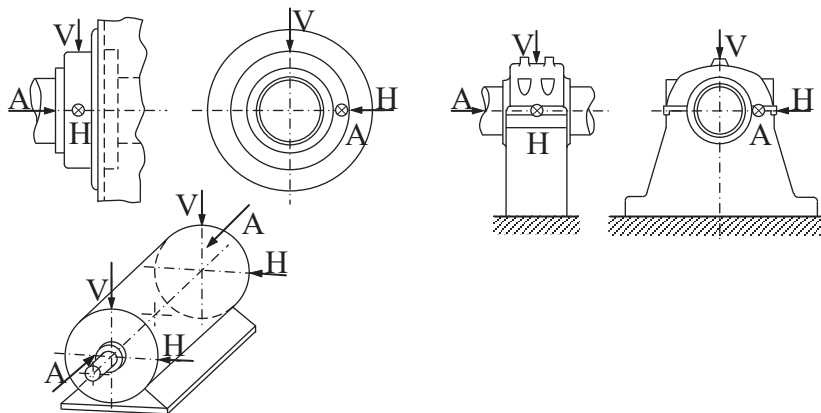
Dla oceny stanu drganiowego maszyn, utożsamianego z ich stanem dynamicznym w praktyce przyjmuje się najczęściej podział na cztery strefy dynamiczne:

A - STAN DOBRY - (na rys. 9 kolor niebieski) poziom drgań nowo oddanych do eksploatacji maszyn powinien zawierać się w tej strefie.

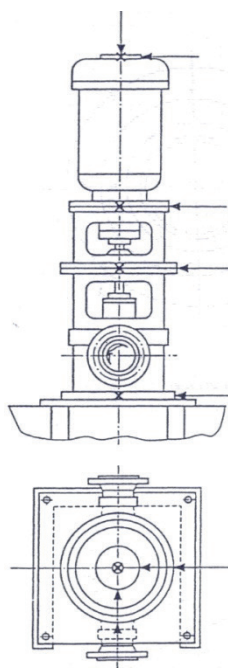
B - STAN UŻYTECZNY - (na rys. 9 kolor zielony) maszyny, których poziom drgań zakwalifikowano do tej strefy mogą pracować długotrwale bez ograniczeń.

C - STAN WARUNKOWO DOPUSZCZALNY - (na rys. 9 kolor żółty) maszyny, których poziom drgań zawiera się w tej strefie uważa się zwykle za nie nadające się do długotrwałej pracy ciągłej. Na ogół maszyna może pracować przez ograniczony czas, aż będzie możliwość podjęcia działań zapobiegawczych, remontowych.

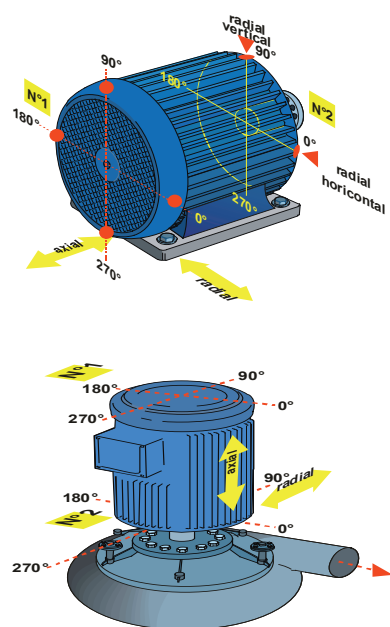
D - STAN NIEDOPUSZCZALNY - (na rys. 9 kolor czerwony) wartości poziomu drgań w tej strefie są uważane za zbyt duże i wskazują na możliwość wystąpienia uszkodzenia maszyny. Po osiągnięciu takiego poziomu drgań maszynę należy wyłączyć.



Rys. 5. Punkty pomiarowe w silniku poziomym wg norm [11]



Rys. 6. Punkty pomiarowe na pionowym zespole maszynowym wg norm [11]



Rys. 7. Punkty pomiarowe i kierunki pomiarów dla przykładowego silnika poziomego i pionowego [16]

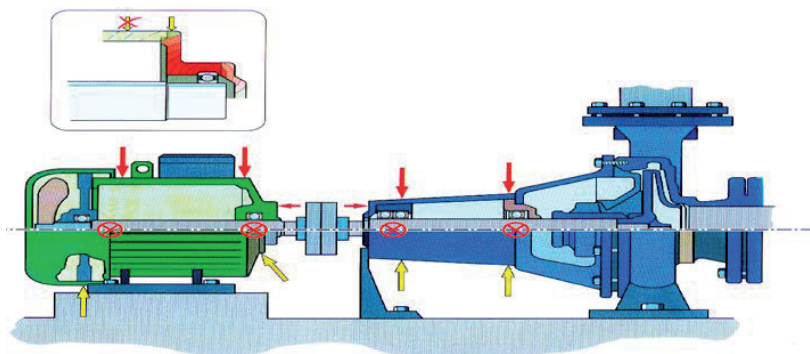
## ■ Podział maszyn na grupy dynamiczne

Ze względu na grupy dynamiczne maszyn, w praktyce przyjmuje się najczęściej podział przeprowadzony stosownie do typu maszyny, mocy znamionowej lub wzniosu osi wału, zgodnie z normą ISO 10816:

- **Grupa 1:** Wielkie maszyny o mocy znamionowej ponad 300 kW; maszyny elektryczne o wzniosie

osi wału  $H \geq 315$  mm, (maszyny te mają zazwyczaj łożyska ślizgowe, zakres prędkości obrotowych rozciąga się od 120 obr./min do 15000 obr./min).

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



Rys. 8. Punkty pomiarowe i kierunki pomiarów drgań dla przykładowego agregatu pompowego [16]

drgań w danym pkt. jest proporcjonalna do intensywności tych sił i do mobilności konstrukcji maszyny w tym pkt. - rys. 11 [8, 14]. Mobilność jest odwrotnością impedancji mechanicznej w danym pkt. i jest miarą łatwości wprowadzenia konstrukcji maszyny w ruch [8, 14]. Zależność pomiędzy siłą, mobilnością i prędkością drgań dla przykładowego pkt. w przykładowym zespole maszynowym przedstawiono na rys. 11. Stosując skale logarytmiczne można dodać do siebie widma siły oraz mobilności i uzyskać wypadkowe widmo prędkości drgań. Charakterystyka mobilności maszyn z reguły zmienia się w czasie nieznacznie. Można w związku z tym z dużym stopniem prawdopodobieństwa założyć, że zwiększenie intensywności drgań maszyny jest spowodowane zwiększeniem intensywności sił w tym samym stopniu [8, 14].

Z badań nad mobilnością maszyn [14] wynika, że dla podobnych maszyn, mobilność w określonym pkt. pomiarowym może różnić się nawet 1000 razy. Oznacza to, że stosowanie tych samych bezwzględnych wartości granicznych drgań dla oceny stanu dynamicznego maszyn jest wątpliwe. Znacznie bardziej wiarygodne jest ocenianie na podstawie względnych zmian w czasie.

- **Grupa 3:** Pompy z wirnikami wielołopatkowymi i z oddzielnym napędem (odśrodkowe, o mieszanym przepływie lub o przepływie osiowym) o mocy znamionowej powyżej 15 kW (maszyny tej grupy mogą mieć łożyska ślizgowe lub łożyska toczne).
- **Grupa 4:** Pompy z wirnikami wielołopatkowymi i z wbudowanym napędem (ośrodkowe, o mieszanym przepływie i o przepływie poosiowym) o mocy znamionowej powyżej 15 kW (maszyny tej grupy mogą mieć łożyska ślizgowe lub łożyska toczne).

Dodatkowo, do czasu ukazania się stosownej części ISO 10816 wyróżnić możemy pozostałe - czyli maszyny o mocy znamionowej do 15 kW.

Wymagania drganiowe wobec maszyn przedstawiono w tabelach 1÷2 i na rys. 10.

### ■ Podstawy badań diagnostycznych

Wynik pomiaru drgań w pkt. pomiarowych na powierzchni maszyny: rys. 5-8 jest odbiciem sił powstających w maszynie a transmitowanych do tych punktów. Bieżąca wartość prędkości

		sztywny		podatny		sztywny		podatny		Fundament		Prędkość drgań 10 - 1000 Hz n ≥ 600 1/min 2 - 1000 Hz n < 600 rpm
		Pompy > 15 kW promieniowe, osiowe		średnie maszyny 15 kW < P ≤ 300 kW silniki 160 mm ≤ H < 315 mm		duże maszyny 300 kW < P < 50 MW silniki 315 mm ≤ H		Typ maszyny		Grupa		
		napęd bezpośredni		napęd zewnętrzny		Grupa 2		Grupa 1				
		Grupa 4		Grupa 3		Grupa 2		Grupa 1				
	11	0.44										
	7,1	0.28										
	4,5	0.18										
	3,5	0.11										
	2,8	0.07										
	2,3	0.04										
	1,4	0.03										
	0,71	0.02										
	mm/s rms	inch/s rms										

- A stan idealny
- B dopuszczenie do ruchu bez ograniczeń
- C dopuszczenie do ruchu z ograniczeniami
- D zagrożenie awarią

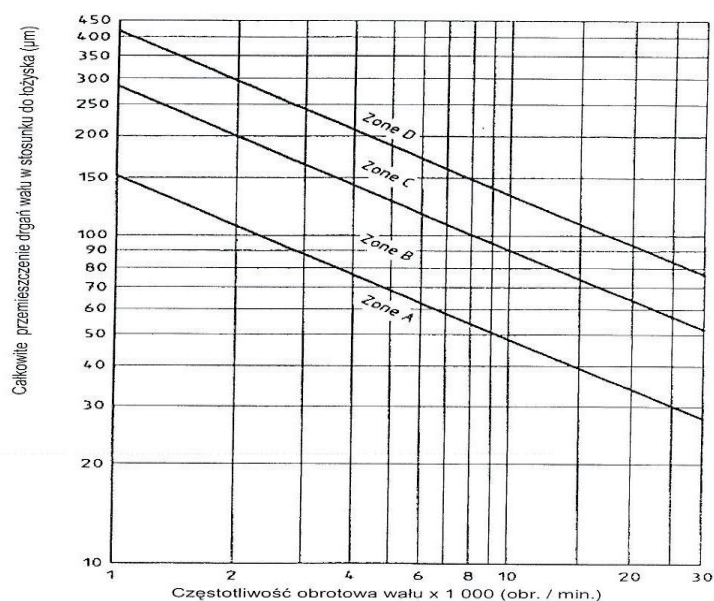
Rys. 9. Graniczne dopuszczalne poziomy wibracji wg normy PN-EN-ISO 10816 [11]

**Tab. 1. Klasyfikacja stref dla poszczególnych grup maszyn - drgania bezwzględne [11]**

GRUPA	POSADOWIENIE	GRANICE STREFY	PRĘDKOŚĆ DRGAŃ, WARTOŚĆ SKUTECZNA VRMS [mm/s]
1	Szttywne	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1
1	Sprężyste	A/B	3,5
		B/C	7,1
		C/D	11
2	Szttywne	A/B	1,4
		B/C	2,8
		C/D	4,5
2	Sprężyste	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1
3	Szttywne	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1
3	Sprężyste	A/B	3,5
		B/C	7,1
		C/D	11
4	Szttywne	A/B	1,4
		B/C	2,8
		C/D	4,5
4	Sprężyste	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1

**Tab. 2. Klasyfikacja stref dla maszyn o mocy znamionowej poniżej 15 kW - drgania bezwzględne [10]**

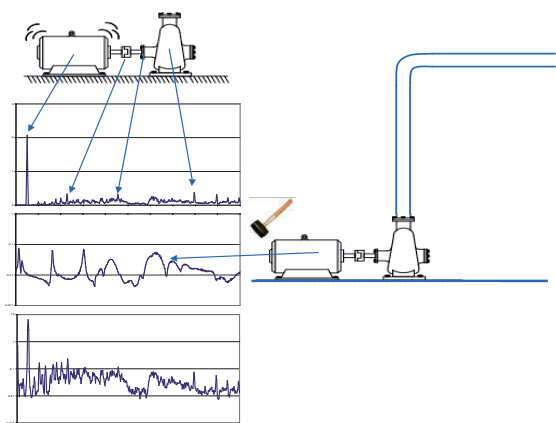
GRANICE STREFY	PRĘDKOŚĆ DRGAŃ, WARTOŚĆ SKUTECZNA VRMS [mm/s]
A/B	0,71
B/C	1,80
C/D	4,50


**Rysunek A.1 – Zalecane wartości maksymalnego względnego przemieszczenia wału w funkcji maksymalnej prędkości roboczej dla sprzężonych maszyn przemysłowych**

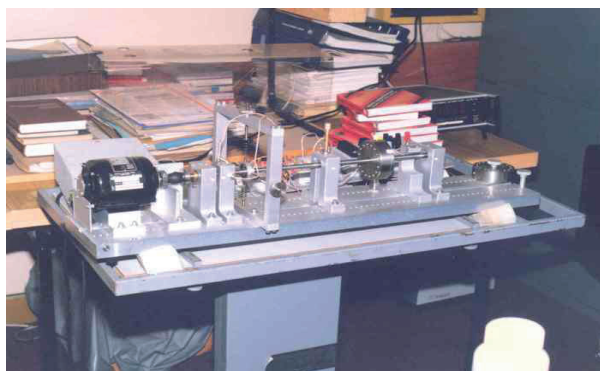
W praktyce, w diagnostyce drganiowej maszyn podstawą oceny ich stanu, jest śledzenie trendu zmian poziomów drgań maszyn w czasie oraz analiza widmowa drgań zorientowana na znalezienie fizycznych przyczyn występowania określonych dominant w widmie drgań. Ilustrują to rys. 12÷14. Od chwili pierwszego uruchomienia maszyn powinno się prowadzić systematyczne pomiary drganiowe. Pomiary należy wykonywać aparaturą przenośną lub stacjonarną - mierzymy szerokopasmowe poziomy drgań ( $V_{RMS}$ ,  $A_{RMS}$ ) oraz wartości szczytowe przyspieszenia drgań. I celowym jest również wykonanie analizy częstotliwościowej sygnału. Otrzymane widma są widmami wzorcowymi, dla maszyny w stanie dobrym. Staramy się ustalić przyczyny występowania poszczególnych dominant w widmie - rys. 13. Mamy do wyboru: własny eksperyment diagnostyczny na specjalnym stanowisku diagnostycznym - rys. 15 i 16, eksperyment na badanym zespole maszynowym, lub specjalistyczną literaturę.

Na specjalistycznym stanowisku diagnostycznym możemy w miarę dowolnie eksperymentować. Wprowadzamy celowo poszczególne „wady i niesprawności”, np.: niewyważę, określonego rodzaju nieosiowość, bądź luz, uszkodzenie łożyska tocznego lub ślizgowego, itd. Mierzmy drgania w pkt. pomiarowych (głównie na łożyskach we wszystkich kierunkach) i obserwujemy charakterystyczne zmiany w widmie drgań. Stwierdzamy, że występują charakterystyczne dominanty i obszary w widmie, które wyróżniają określony przypadek diagnostyczny - rys. 13, rys. 17, rys. 18, rys. 20. Przy braku specjalistycznej aparatury możemy się zdecydować na najprostszą tzw. subiektywną ocenę diagnostyczną dokonywaną przez eksperta. Przykład najprostszego sposobu diagnozowania łożyska tocznego przez autora przedstawiono na rys. 19. Wynik specjalistycznych pomiarów diagnostycznych analizatorem drgań tego samego łożyska przedstawia rys. 20. Jest to detekcja obwiedni przyspieszenia drgań, a właściwie zmodyfikowana metoda detekcji

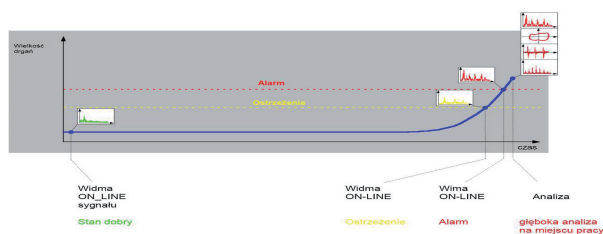
**Rys. 10. Klasyfikacja stref dla poszczególnych maszyn - drgania względne [12]**



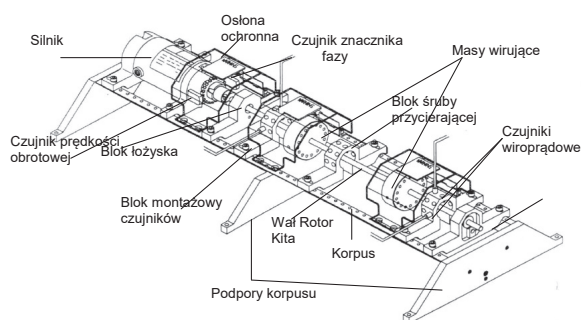
Rys. 11. Mechanizm fizyczny powstawania drgań [8, 14]



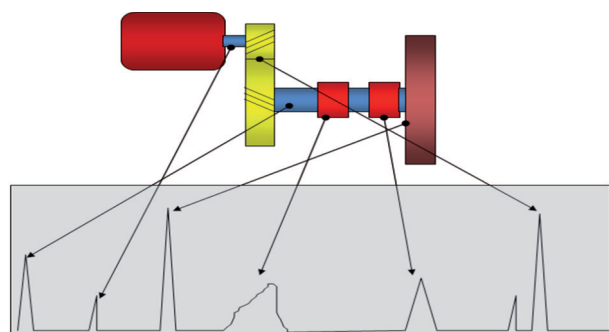
Rys. 15. Przykładowy prosty model maszyny wirnikowej [9]



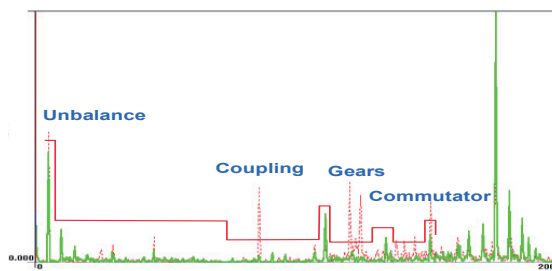
Rys. 12. Trend zmian w czasie poziomów drgań dla przykładowej maszyny [13÷15]



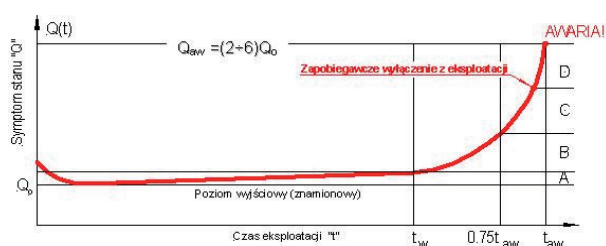
Rys. 16. Przykładowe stanowisko diagnostyczne badawczo-dydaktyczne Rotor-Kit [1]



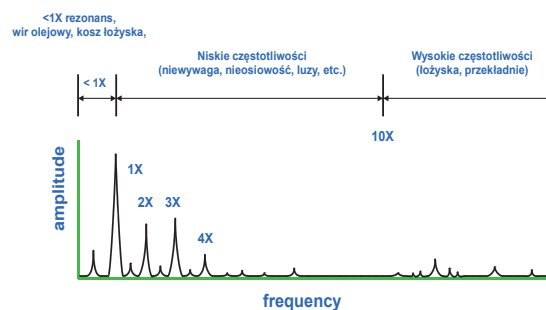
Rys. 13. Widmo drgań dla przykładowej maszyny, w uproszczony sposób wskazano fizyczne pochodzenie poszczególnych dominant w widmie [13÷15]



Rys. 17. Widmo drgań dla przykładowego zespołu maszynowego składającego się z silnika i przekładni, wskazano fizyczne pochodzenie poszczególnych dominant w widmie (unbalance - niewyważa, coupling - sprzęgło, ears - koło zębate, commutator - komutator) [14]



Rys. 14. Zalecane decyzje diagnostyczne i działania zapobiegawcze [13÷15]

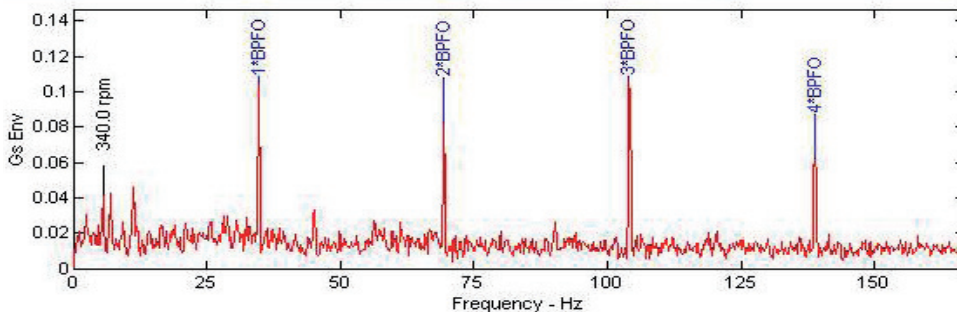


Rys. 18. Widmo drgań dla przykładowego zespołu maszynowego składającego się z silnika na łożyskach tocznych, przekładni, pompy na łożyskach ślizgowych, wskazano fizyczne pochodzenie poszczególnych dominant w widmie [14]

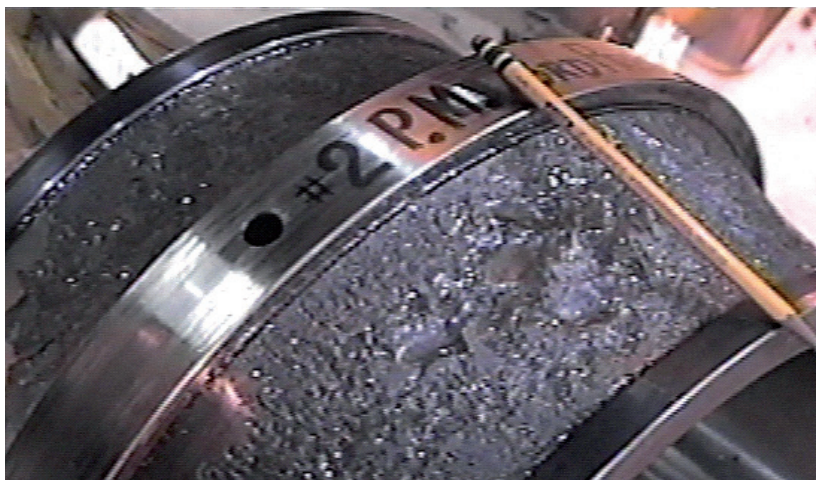




Rys. 19. Najprostszy sposób diagnozowania łożyska tocznego  
osłuchanie łożyska przez autora [16]



Rys. 20. Wynik specjalistycznych pomiarów diagnostycznych łożyska z rys. 15, detekcja obwiedni wskazuje na uszkodzenie łożyska



Rys. 21. Łożysko toczne, którego awarie wykrył ekspert oraz specjalistyczna aparatura

obwiedni [16]. Opinia eksperta o łożysku była bardzo negatywna, podobnie jak wynik specjalistycznych badań analizatorem. Silnik zatrzymano, łożysko zdekontrowano. Uszkodzenie łożyska było bardzo poważne. Przedstawia je rys. 21. □

#### Literatura:

1. Bently Nevada Corporation: *Rotating Machinery Information Systems and Services. Applications Note. Minden, 1990.*
2. Brüel & Kjær: *Systematic Machine Condition Monitoring. Applic. notes BO 0299-11.*
3. Brüel & Kjær: *Peak and Envelope Analysis for Bearing Fault Detection. Applic. notes BO 0286-11.*
4. Brüel & Kjær: *Machine Condition Monitoring using Vibration Analysis. Applic. notes BO 0247-11.*
5. Brüel & Kjær: *Machine Condition Monitoring using Vibration Analysis. Applic. notes BO 0253-11.*
6. Brüel & Kjær: *Envelope analysis the key to rolling - element bearing diagnosis. Application notes BO 0187-11.*
7. Brüel & Kjær Condition Monitoring Systems Division: *Compass Applik. notes BP 1053-13.*
8. Brüel & Kjær, *Wibracje i wstrząsy, Nota Aplikacyjna, BR0106.*
9. Dwojak J.: *Opracowanie efektywnej diagnostyki eksploatacyjnej zespołów maszynowych w energetyce na przykładzie PGE Elektrowni OPOLE S.A. Rozprawa doktorska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska, Opole, 2012.*
10. Dwojak J., Szymaniec S.: *Diagnostyka eksploatacyjna zespołów maszynowych w energetyce. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, Studia i Monografie, zeszyt nr 344.*
11. PN-ISO 10816-1. *Drgania mechaniczne. Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących. Wytyczne ogólne.*
12. PN-ISO 7919-1, 2, 3. *Drgania mechaniczne maszyn z wyłączeniem maszyn tłokowych. Pomiar drgań wałów wirujących i kryteria oceny. Część 1, część 2, część 3.*
13. SKF: *Integrated Condition Monitoring 2004.*
14. SKF: *Integrated Condition Monitoring 2014.*
15. SKF Technology Conference: *Beyond 16-19/05/2000.*
16. Szymaniec S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, Studia i Monografie, nr 333.*