

---

# Zakład Ekspertyz Naukowo-Technicznych w Zakresie Wibroakustyki

---



J. Tomaszewski

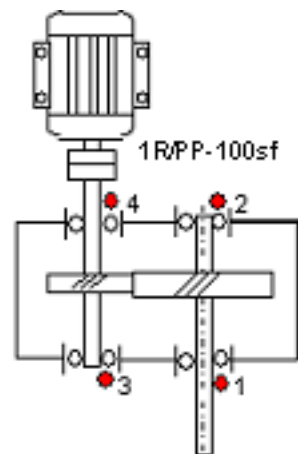
## DIAGNOSTYKA PRZEKŁADNI W WARUNKACH PRZEMYSŁOWYCH

E-mail [zentjt@neostrada.pl](mailto:zentjt@neostrada.pl)

Tel. 607326177

## Definicja przekładni

- ◆ Przekładnie zębate są podzespołem układów napędowych składających się najczęściej z : silnika napędowego, sprzęgła elastycznego, przekładni zębatej





# Przyczyny uszkodzeń przekładni ogólnego przeznaczenia



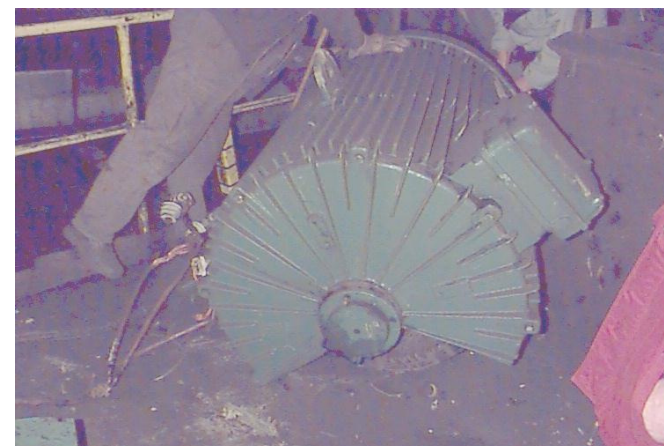
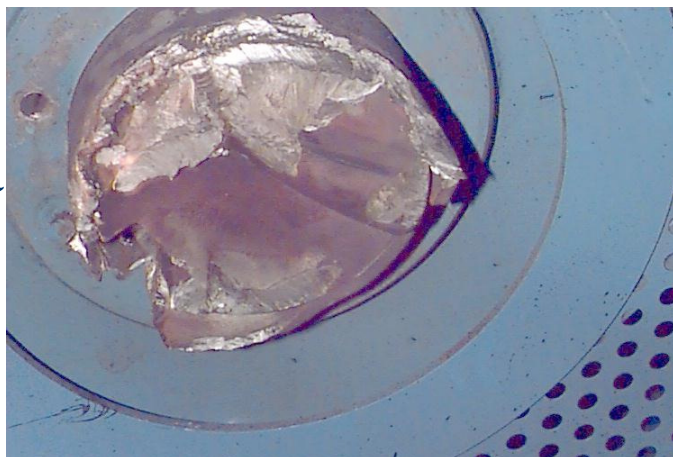
1. Nieszczelności spowodowane uszkodzeniami pierścieni uszczelniających
2. Uszkodzenia łożysk tocznych
3. Uszkodzenie sprzęgła
4. Wyłamanie zębów
5. Zużycie zębów ( pitting, spalling, scuffing,)
6. Pęknięcia i zużycia wałów
7. Inne ( pęknięcia korpusu, uszkodzenia silnika)

# Koincydencja pomiędzy uszkodzeniami

- ◆ Największe oddziaływanie destruktywne na pozostałe elementy przekładni ma awaria łożysk i wyciek oleju
- ◆ Każda awaria jednego elementu przekładni, pociąga za sobą możliwość wystąpienia awarii innych elementów (efekt domino)
- ◆ Istnieje związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy uszkodzeniem łożysk a uszkodzeniem zębów

# Przykład koincydencji uszkodzeń

Przyczyna  
Skutek



# Obrazy typowych uszkodzeń przekładni

Wykruszenie



Wyłamanie zmęczeniowe



Pitting



Zacieranie (scuffing)





# Zadania diagnozowania



Zadaniem diagnostyki jest wykrycie uszkodzeń i nieprawidłowości pracy przekładni zębatej. Wykrywanie uszkodzeń i innych nieprawidłowości pracy przekładni odbywa się poprzez monitorowanie i analizę sygnałów drganiowych, temperaturę, analizę produktów powstałych w wyniku uszkodzeń.



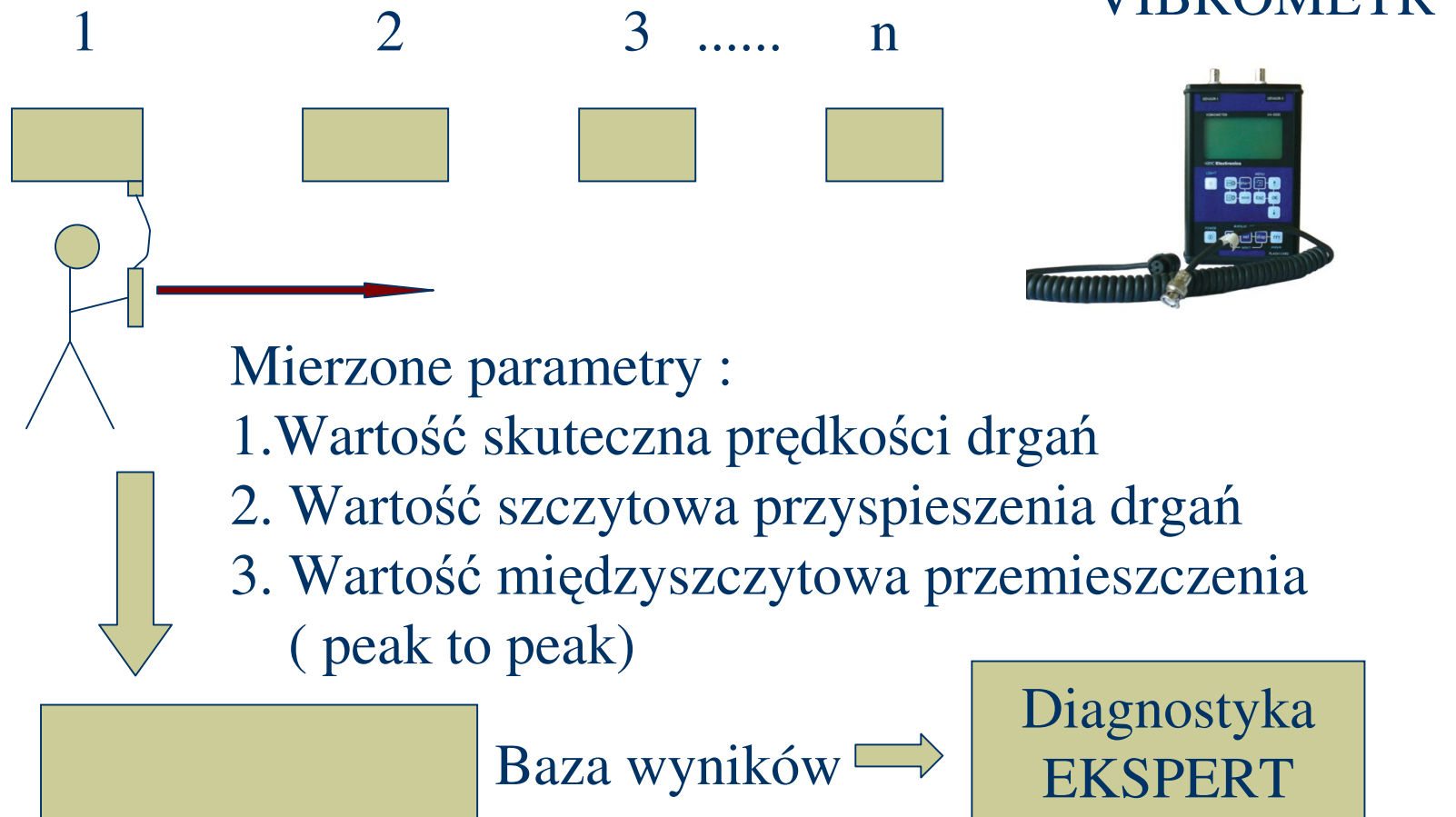
# Stosowane systemy diagnozowania przekładni



1. Obchodowy system monitorowania przekładni
2. Ciągłe systemy diagnozowania przekładni
3. Diagnozowanie przyczyn pogarszania się stanu technicznego przekładni



# Obchodowy system monitorowania



# Ciągłe monitorowanie



- Zasilanie 24 V DC lub 220 AC
- Mierzone parametry : RMS lub szczyt v,a temperatura
- Sygnalizacja stanu diagnozowania ( 3 diody – zielona, żółta, czerwona)
- Alarm za pomocą GSM, M20
- Rejestracja parametrów przez okres 4 lata tj. 2 x co 10 minut

System VIBCOM firmy „ENERGOCONTROL” Kraków

# Kryteria oceny

Mierzony parametr :  $v_{\text{skuteczne}}$  pasmo 45-1590 Hz

(załącznik D do PN-ISO 8579-2)

Zatrzymaj i dokonaj przeglądu – powyżej 8 do 12 mm/s

Groźny stan – powyżej 12 do 18 mm/s

Zatrzymaj natychmiast – powyżej 18 mm/s

Mierzony parametr :  $a_{\text{szczyt}}$  pasmo 1-4 kHz( wg. Blake M.P.)

Do planowanej wymiany w 21 dniach – do 31,6 mm/s

Groźny, napraw w ciągu 2 dni - do 178 mm/s

Katastrofalny, wyłącz natychmiast – powyżej 1000 mm/s

Mierzony parametr :  $v_{\text{szczyt}}$  wg. Jacksona

Bez działania – do 7,62 mm/s

Zaplanuj remont – do 10,16 mm/s

Wykonaj remont – do 15,24

Natychmiast zatrzymaj – powyżej 15,24



# Kryteria oceny

Mierzony parametr – przemieszczenia  $\mu\text{m}$  pasmo do 200Hz  
( dotyczy tylko posadowienia, fundamentów)

W kierunku poziomym – mniej niż 200

W kierunku pionowym – mniej niż 150

Ocena wg. wg.PN 80/B-03040

# Metodyka pomiarów

Metodyka pomiaru zgodna z PN-ISO 8579-2

1. Drgania korpusu powinny być mierzone na sztywnym fragmencie korpusu, takim jak obudowa łożysk.
2. Pomiary nie powinny być wykonywane na tych fragmentach korpusu, które nie podpierają łożysk
3. Pomiary powinny być wykonywane w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, z których dwa leżą w płaszczyźnie , najlepiej prostopadłej do osi obrotu kół zębatych
4. Zaleca się, żeby pomiary były wykonywane we wszystkich dostępnych miejscach łożyskowania przekładni zębatej

# Generalna zasada dla przekładni ogólnego przeznaczenia

Przekładnie o  $v_{rms} < 8$  mm/s : praca bez nagłych awarii

Przekładnie o  $v_{rms} > 8$  mm/s : nagłe awarie, ciągłe kłopoty eksploatacyjne

Należy dążyć do tego, aby napędy zębate posiadały poziom drgań mniejszy od 8 mm/s

# Potrzebne dane do diagnostyki przekładni

1. Schemat kinematyczny napędu z przekładnią
2. Ilość zębów poszczególnych stopni przekładni
3. Typy łożysk ułożyskowania wałów przekładni
4. Typ sprzęgieł połączeniowych ( Ilości elementów np. palców sprzęgieł podatnych itp..)
5. Prędkość obrotowa wejściowa lub wyjściowa przekładni

# Obliczane teoretyczne parametry

1. Częstotliwość obrotowa wału  $f_o = n_w/60$  Hz
2. Częstotliwość zazębienia przekładni  $f_z = f_o \times z_1$   
gdzie :  $z_1$  – ilość zębów koła zamocowanego na wale  
obracającym się z częstotliwością  $f_o$
3. Kinematyczna częstotliwość zazębienia  $f_k = f_z / \text{NWW}(z_1, z_2)$   
gdzie : NWM – najmniejsza wspólna wielokrotność ilości  
zębów koła i zębniaka danego stopnia
4. Częstotliwości charakterystyczne uszkodzeń elementów  
łożysk tocznych (odczytywane z bazy producentów łożysk)



# Przykład przygotowania danych do obliczeń

**Program do opracowania wyników pomiarowych widma z miernika SVAN**

Dane ogólne mierzonej maszyny				Dane o obciążeniu maszyny					
Rodzaj maszyny :	Przekładnia			Wejście napędu		Wyjście napędu			
Oznaczenie :	WB161-10			Tryb 1	Moc znamionowa :	1500	Tryb 1	Moc znamionowa :	1500
Numer fabryczny :	Lewa				Moc rzeczywista :	509		Moc rzeczywista :	509
Miejsce pracy :	Nowiny - Miłyn Cementu				Obroty znam. :	985		Obroty znam. :	99,6
Data pomiarów :	2001-11-08				Obroty rzeczyw. :	990		Obroty rzeczyw. :	100,1
Częstotliwości uszk. Łożysk dla n=1000 1/min				Parametry ząbienia					
Zmiana nazwy protokołu				1 st	Ilość zębów zębnik:	21	3 st	Ilość zębów zębnik:	
					Ilość zębów koło:	79		Ilość zębów koło:	
				2 st	Ilość zębów zębnik:	27	4 st	Ilość zębów zębnik:	
					II. zębów satelita:	71		Ilość zębów koło:	
				II. Zęb.koło słon.:					

Wykaz aparatury pomiarowej				
Nazwa	Producent	Typ	Nr. fabr.	
Wzmocniacz PCB	PCB	116	24079	
SVAN	SVANTEK s-ka z o.o	912	2179	
Czuinik przyspieszeń	PCB	B33-353	SN1732	

**Łożyska**

Typ	Częstotliwości dla 1000 1/min			wg.VDI2156		d w mm	D z mm	poprzeczne -1 wzdłużne -2	Oznaczenie	1 wart
	P.Z.	P.W.	E.T.	KOSZYK	poprz.					
23238A	153,99	196,01	115,43	7,33	5,92	0,00	190	340	1	1
23238A	153,99	196,01	133,4	7,33	5,92	0,00	190	340	1	2
23238A	153,99	196,01	133,4	7,33	5,92	0,00	190	340	1	3
23164A	163,44	203,23	148,58	7,43	1,63	0,00	320	540	1	4
23164A	163,44	203,23	148,58	7,43	1,63	0,00	320	540	1	5
23072A	228,72	271,28	192,19	7,62	0,67	0,00	360	540	1	6
23072A	228,72	271,28	192,19	7,62	0,67	0,00	360	540	1	7

Zapis do formularza    Program obliczeń

# Przykład obliczeń

**Obliczenia wraz z wynikami**

Nazwa pliku: **MCL\_7A** Pasma : **2500 Hz**

Punkt pomiarowy : **1**

Kierunek pomiarów : **V**

Podstawowa	nr. Harm.	Wartość Hz	Częstotliwość szukana
19,23	3	57,70	57,90

Wyszukana wartość: **0,2666**    Dla Częstotliw: **56,15**    Analiza powyżej wartości: **>60**

Widmo

Wyniki

Wpisz do form.

Harmoniczne

**Schemat urządzenia**

Numer wiersza za zapisu **7**

23238A-1  
23238A-2  
23238A-3  
23164A-4  
23164A-5  
-  
23072A-6

Konstrukcja wsporcza 4

Element	lharm.	Łożysko	P.Z	P.W.	E.T.	Koszyk	B.B.	VDI2159
wał 1	16,50							
wał 2	4,39							
wał 3	1,67	23238A	152,5	194,0	114,3	7,3	0,0	5,92
wał 4	0	23238A	152,5	194,0	132,1	7,3	0,0	5,92
wał 5	0	23238A	152,5	194,0	132,1	7,3	0,0	5,92
zazęb-z1	346,50	23164A	43,0	53,5	39,1	2,0	0,0	1,63
zazęb-z2	118,42	23164A	43,0	53,5	39,1	2,0	0,0	1,6
zazęb-z3	0,00	23072A	22,9	27,1	19,2	0,8	0,0	0,7
zazęb-z4	0							
kinemat z1	0,21							
kinemat z2	0,06							
kinemat z3	0,00							
kinemat z4	0,0							
Inne	148,5							

Wprowadź dane

Wyczyść

Zapisz do formularza

Kopia formularza

Głęboka analiza

Udział znaczących amplitud w widmie

# Pierwszy poziom strategii diagnostyki przekładni

## 1 Poziom strategii : obchodowy i ciągły system diagnostyki

Celem strategii jest zbieranie odpowiednich wielkości charakterystycznych, które pozwalają określić ogólny stan drganiowy Przekładni. Rozwój krzywych trendu lub przekroczenie charakterystycznych wielkości określonych progów ukazują pogorszenie stanu przekładni a tym samym zwiększają prawdopodobieństwo awarii urządzenia.

### ***Wielkości charakterystyczne :***

- Amplitudy szczytowe, rms prędkości i przyspieszenia drgań
- Impulsy udarowe do oceny łożysk tocznych
- Temperatura



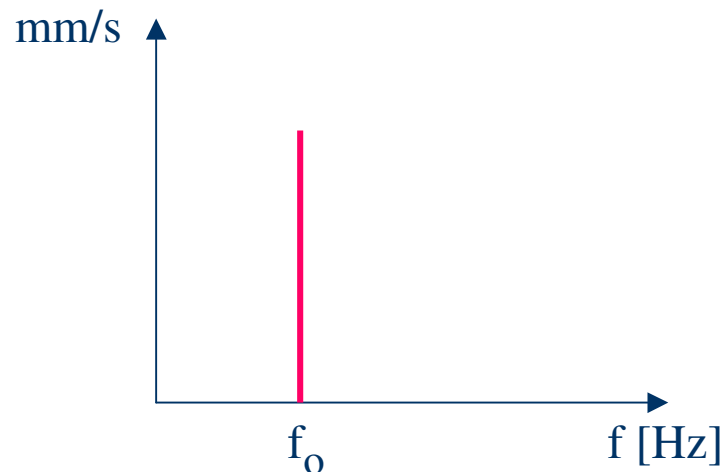
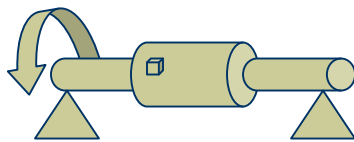
## Drugi poziom strategii diagnostyki przekładni



Dla lokalizacji uszkodzeń, wielkości charakterystyczne są niewystarczające. Aby zlokalizować uszkodzenie, należy przeprowadzić szczegółową analizę drgań, uzupełnioną pomiarami śladu przylegania i struktury bocznej powierzchni współpracujących zębów i analizą rodzajów, ilości i wielkości produktów zużycia. Większość rodzajów uszkodzeń jest rozpoznawalna na widmach w postaci charakterystycznych prążków widmowych o określonych częstotliwościach.

# Sposoby diagnozowania : niewyważenie

Niewyważenie nazywamy mimośrodowym rozkładem masy ciała powodującym powstawanie w swych łożyskach niezrównoważonych sił odśrodkowych. Niezrównoważone siły odśrodkowe wywołują drgania o częstotliwości odpowiadającej prędkości obrotowej wału.



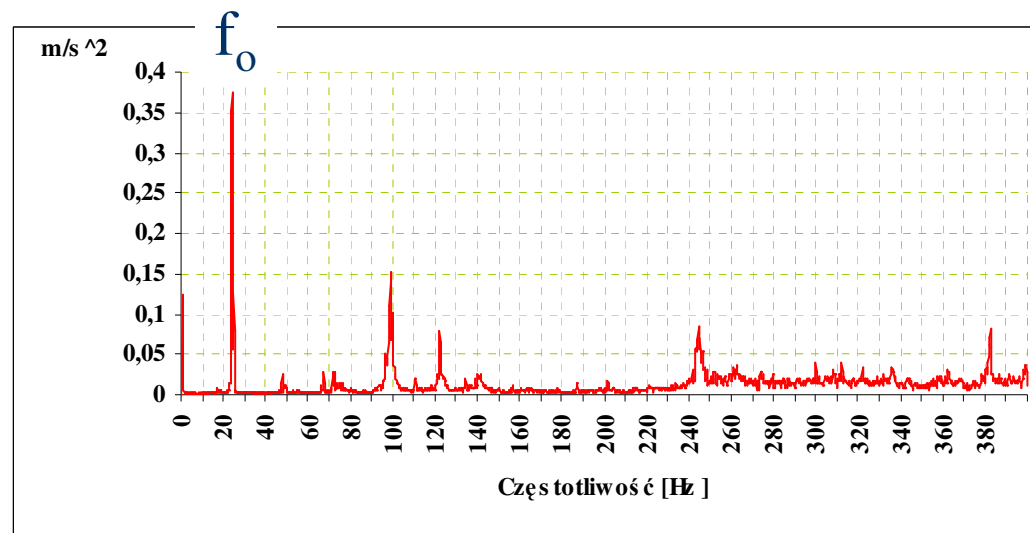
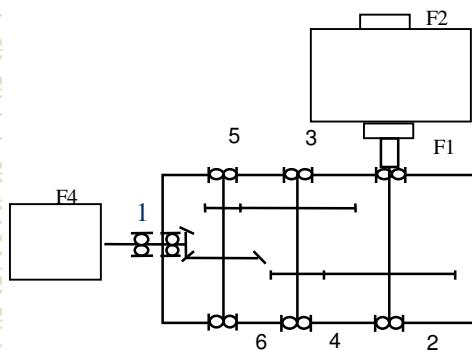
# Przykład widma niewyważenia sprzęgła przekładni

Drgania w punkcie 1V=10,4 mm/s

Klasyfikacja wg. PN-ISO 10816-1 pow. 7,1 –nie nadająca się do długotrwałej eksploatacji.

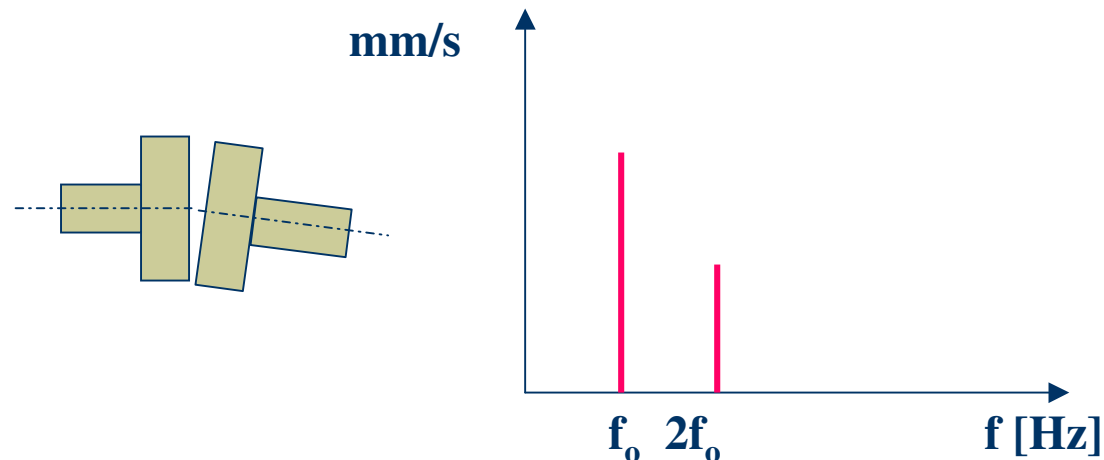
Drgania po wyważeniu 1V=2,1 mm/s

Napęd NTFH-3KA-200-25

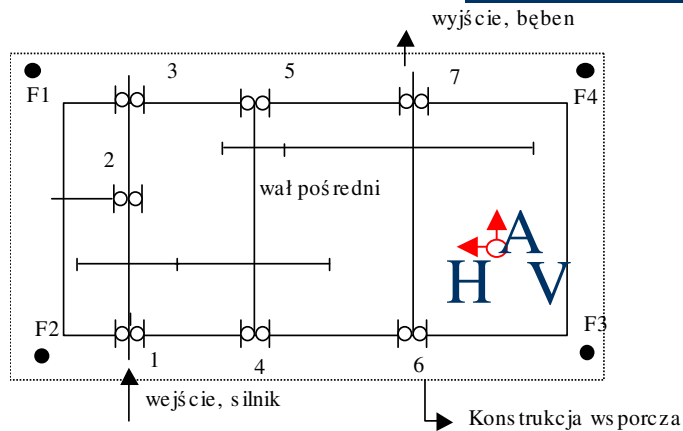


# Sposoby diagnozowania : błędy osiowania

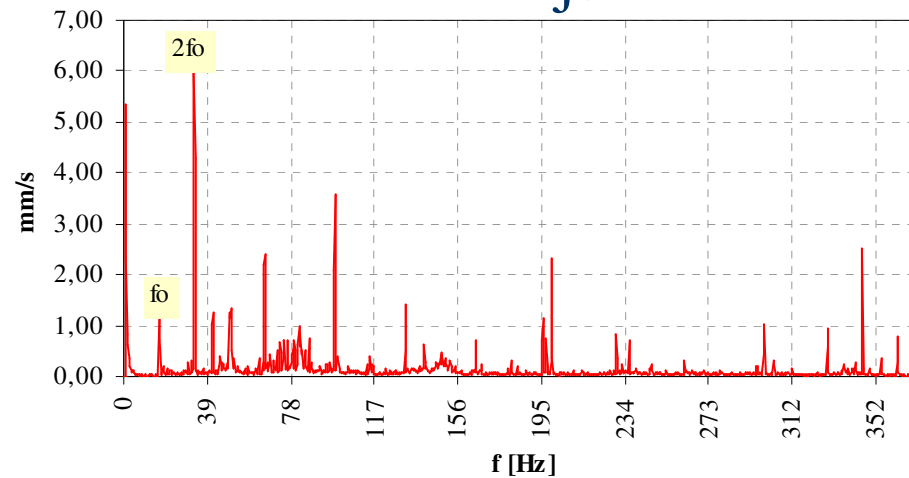
W przypadku maszyn sprzęgniętych bezpośrednio, błędne wyosiowanie powoduje wzrost poziomu drgań o częstotliwości  $2 \times f_0$ . Błąd równoległego przesunięcia wałów względem siebie jest widoczny na widmach mierzonych w kierunku promieniowym, zaś osiowe rozwarście uwidacznia się na widmach w kierunku osiowym.



# Przykład widma błędu osiowania



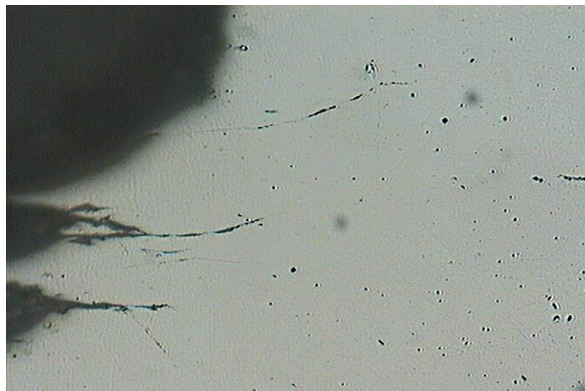
## Wejście silnika





# Sposoby diagnozowania : Pitting, zacieranie (scuffing)

Na skutek powtarzających się nacisków powierzchniowych lub naprężeń podpowierzchniowych, które przekroczyły dopuszczalną granicę dochodzi do uszkodzenia zębów, zwanego zmęczeniem Powierzchniowym ( wg. PN-91/M-88506). Zmęczenie to charak – teryzuje się powstawaniem plam lub wgłębień zmęczeniowych (jamek) na pracującym boku zęba.



# Diagnozowanie i ocena pittingu I

Diagnozowanie pittingu jest stosunkowo łatwe, wystarczy obejrzeć wzrokowo powierzchnię zębów, aby wykryć pojawienie się pittingu.

Trudność pojawia się w ocenie zagrożenia rozwoju pittingu na możliwość wystąpienia awarii spowodowanej choćby zmęczeniowym, lub doraźnym wyłamaniem zębów przekładni.

Metoda oceny rozwoju pittingu polega na wykonaniu zdjęć losowo wybranym co najmniej 5 spittingowanych zębów przekładni, a następnie ocenie powierzchni spittingowanej zęba do jego czynnej powierzchni wg. zależności :

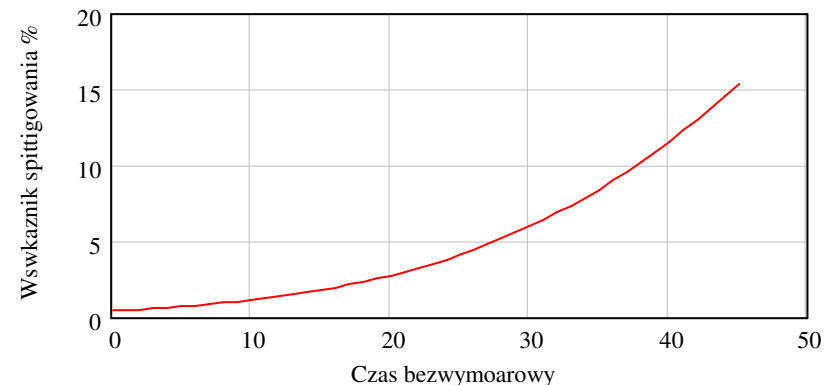
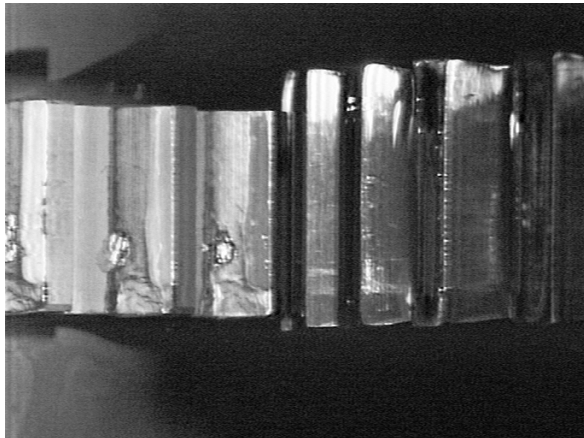
$$W_p = A_{sp}/A_{cz} \times 100 \%$$

# Diagnostowanie i ocena pittingu II

Przykład oceny rozwoju pittingu dla kół wykonanych ze stali 40HM

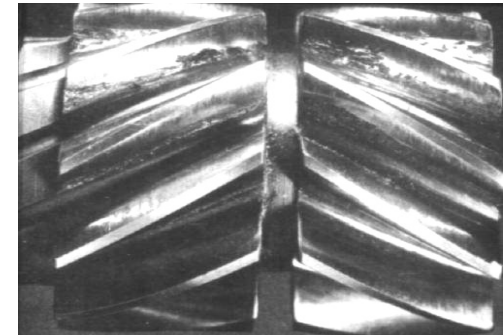
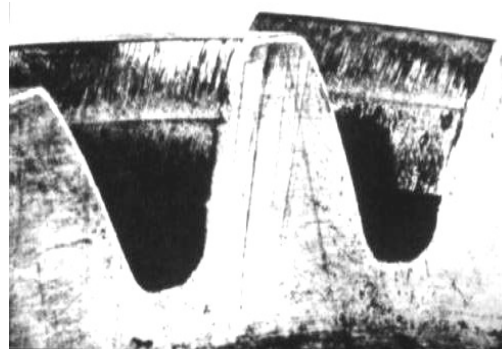
Nr. zęba	1	12	16	20	26
% Pow.	3,9	0,87	4,5	2,7	1,3

Wartość średnia : 2,7 % \* Dopuszczalna :5%



# Zacieranie (scuffing)

Definicja procesu zacierania proponowana przez Organizację Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD) mówi, że zacieranie jest to miejscowe uszkodzenie wywołane pojawieniem się szczepień w stanie stałym, bez śladów nadtapiania powierzchni.



# Diagnozowanie zacierania I

Diagnozowanie zatarcia w przekładniach przeprowadza się w oparciu o kryterium temperaturowe H.Bloka. W metodzie tej wartością mierzoną jest temperatura powierzchni zęba :

$$T = T_M + T_f$$

Gdzie :  $T_M$  – temperatura masowa zęba (temperatura zęba tuż przed wejściem w przypór

$T_f$  – temperatura błyskowa (temperatura chwilowa styku dwóch par zębów).

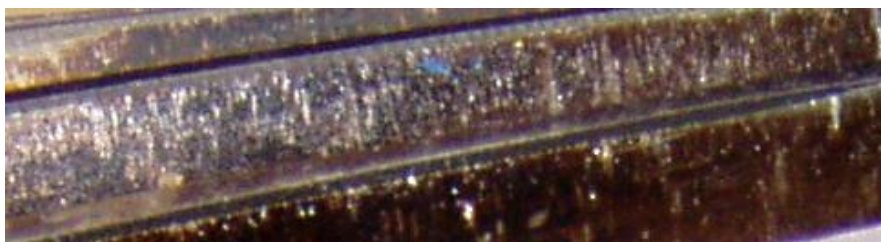
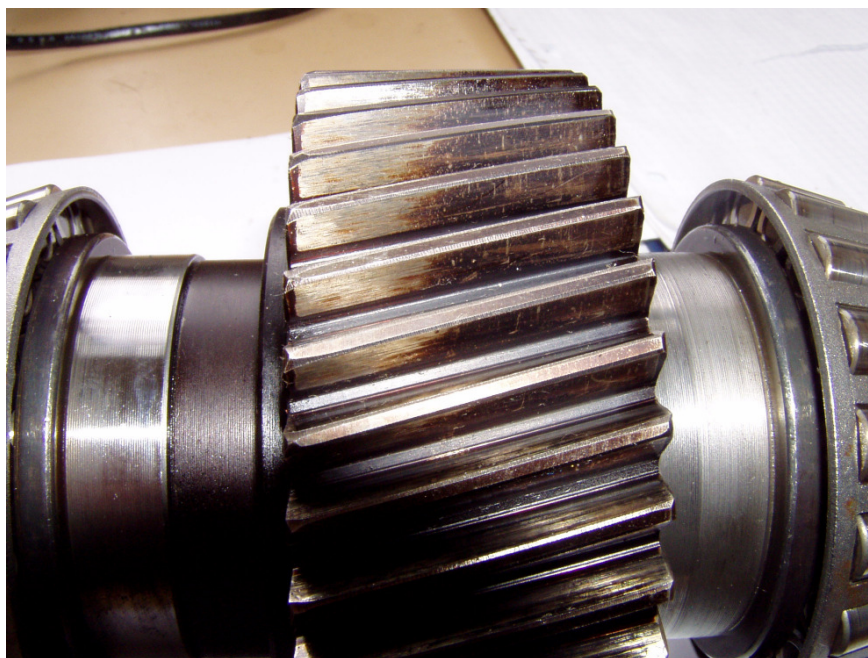
Pomiar temperatury powierzchni zęba w warunkach przemysłowych jest praktycznie niemożliwy. Możliwym do realizacji jest pomiar temperatury oleju wewnątrz przekładni. Jednakże ze względu na dużą wartość bezwładności cieplnej, temperatura styku może być kilkakrotnie wyższa niż temper. oleju.

# Diagnozowanie zacierania II

Przyjmuje się następującą strategię :

1. Jeżeli nastąpił wzrost temperatury oleju, poza normalny przedział zmienności, należy obserwować trend wzrostu temperatury oleju.
2. Równolegle należy mierzyć temperaturę obudowy łożysk. Jeśli zaobserwuje się lokalny gradient temperatury obudowy łożysk lub pierścieni uszczelniających, świadczyć to będzie o uszkodzeniu tych elementów
2. Jeżeli temperatura oleju przekroczy wartość 70-80 °C, należy zatrzymać przekładnię i sprawdzić powierzchnię zębów.
3. Należy szukać na powierzchni zębów śladów spalonego oleju
4. Spalony olej świadczy, że temperatura powierzchni zęba  $> T_{\text{sam}}$

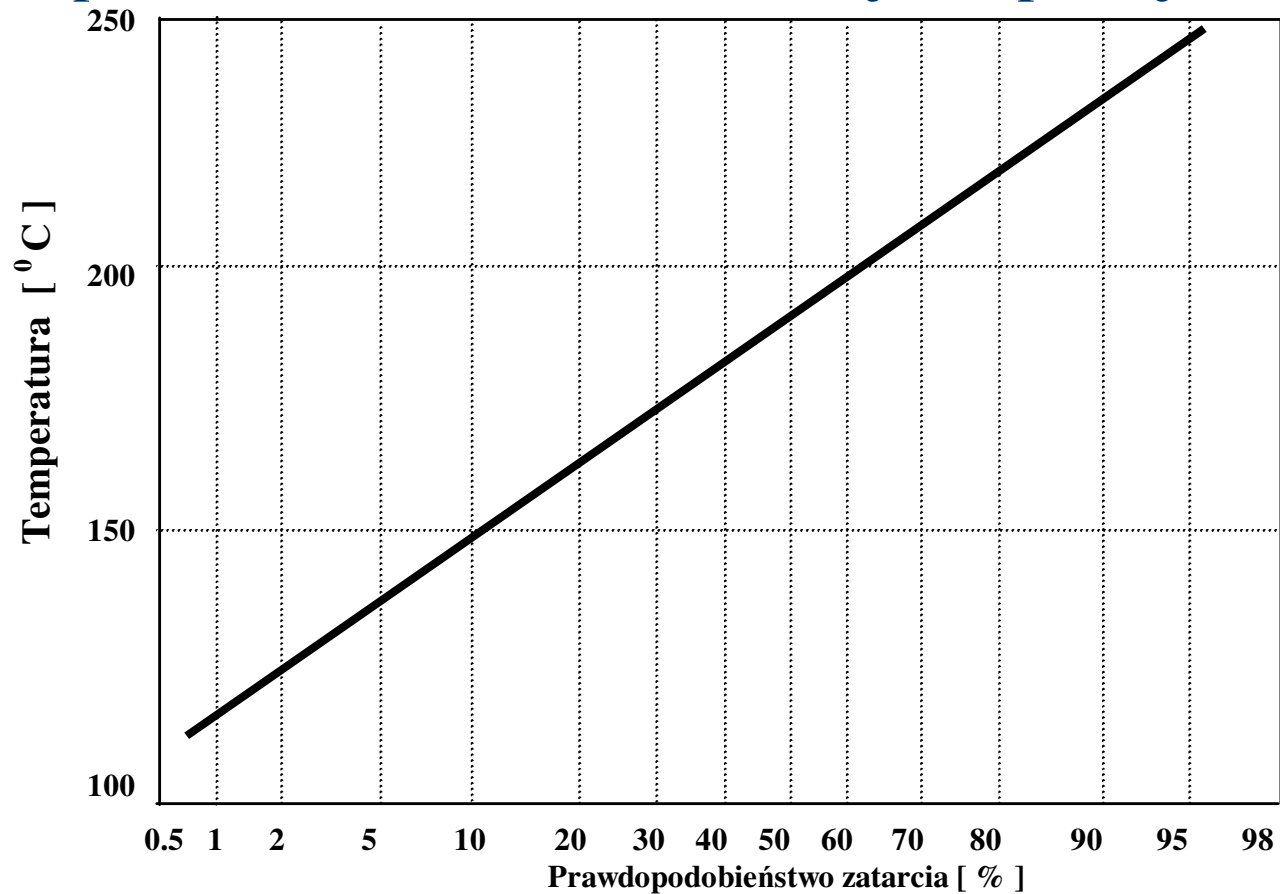
# Diagnozowanie zacierania III



Typ	Temp. zapłonu
TRANSOL	
SP 68	200°C
SP 100	220°C
SP 150	220°C
SP 220	220°C
SP 320	220°C
SP 460	230°C

# Diagnozowanie zacierania IV

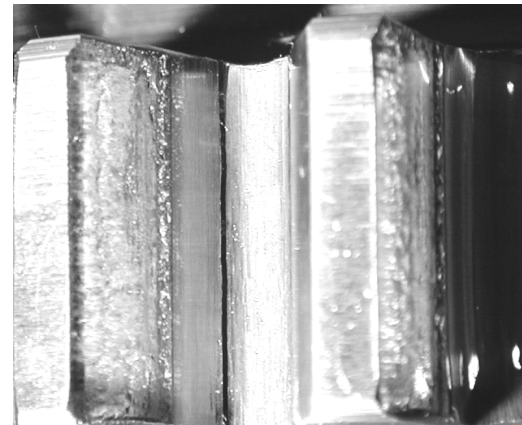
Prawdopodobieństwo zatarcia w funkcji temp. Objętościowej zęba





# Sposoby diagnozowania zmęczeniowych pęknięć zębów

W wyniku powtarzających się naprężeń, które przekraczają dopuszczalną granicę dochodzi do zmęczeniowego złamania zęba. Objawami tego zjawiska jest powstawanie pęknięć zmęczeniowych w podstawie zęba, które propaguje się wraz ze wzrostem liczby cykli pracy koła.



# Diagnozowanie pęknięć zęba I

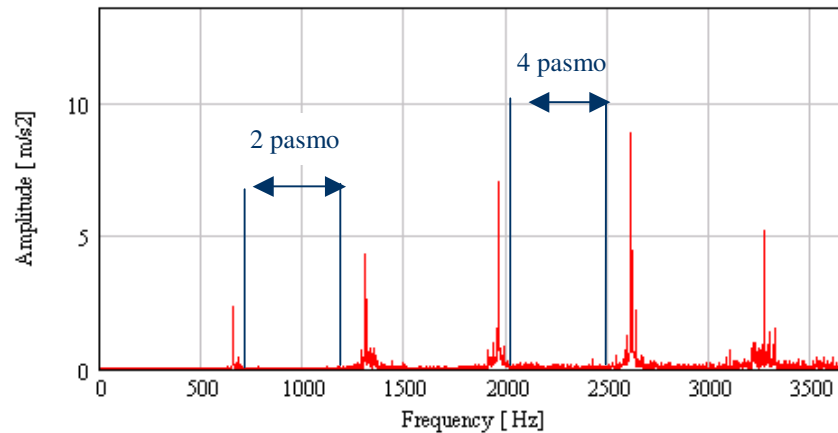
Do diagnozowania pęknięć zmęczeniowych zęba stosuje się Metodę obróbki widma drgań przekładni.

Sposób obróbki widma jest następujący :

1. Należy wybrać fragment widma pomiędzy harmonicznymi zazębienia przekładni.
2. Fragment widma nie powinien zawierać znaczących prążków widma.
3. Estymatą punktową diagnozującą pęknięcie jest wartość średnia tak wybranego widma.

# Diagnozowanie pęknięć zębów II

## Widmo przekładni 1 stopniowej

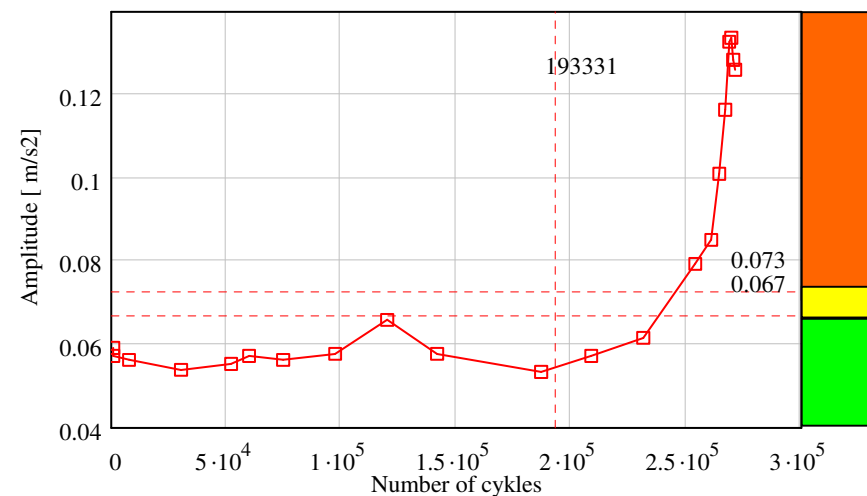


Progi ustala się metodą  
**EVANS**

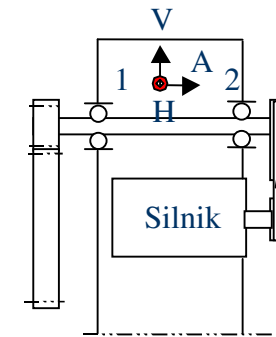
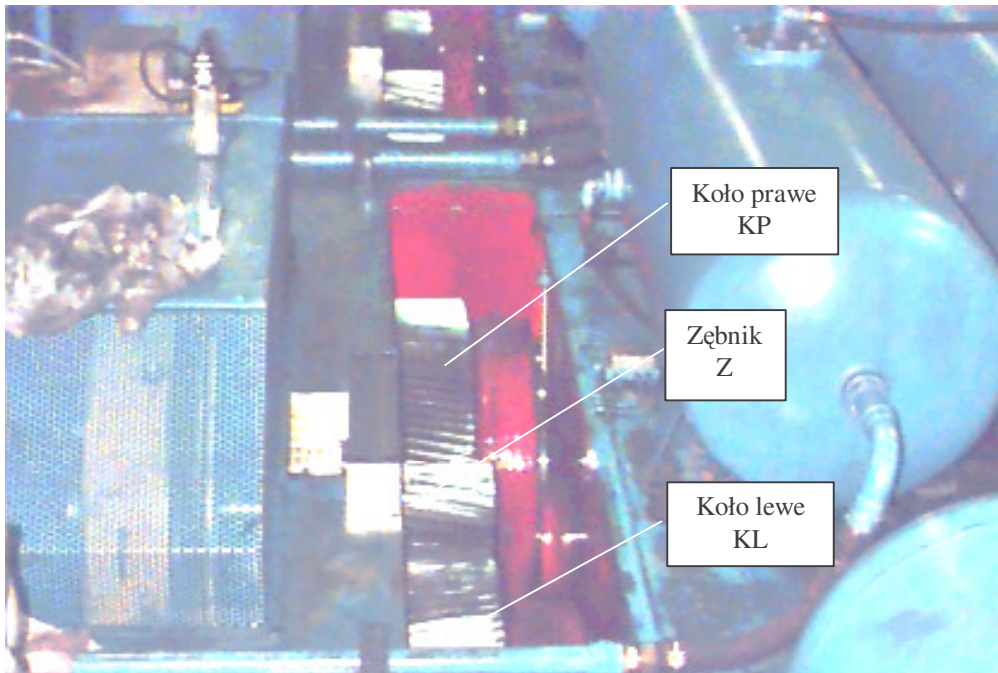
Evaluated vibration analysis method firmy SPM  
Instrument

## Zmiana wartości wskaźnika w funkcji długości pęknięcia

średnia z sumy widma w pasmach 2 i 4



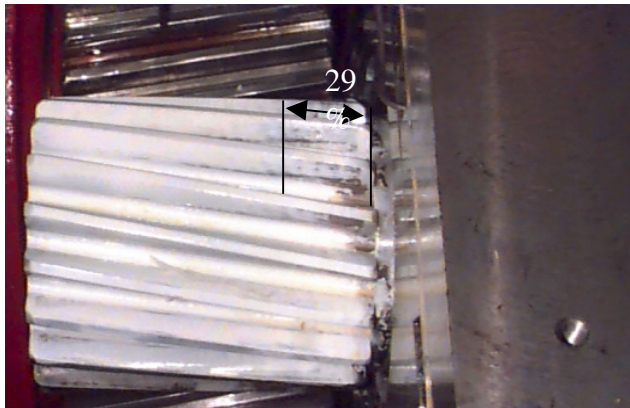
# Przykład I obniżania wibracji



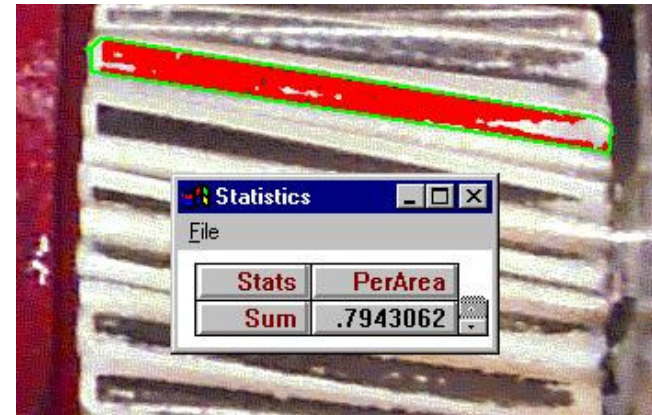
Punkt 2 H - 12,9 mm/s

# Badanie śladu przylegania

Ślad wyjściowy



Po korekcie ustawienia



Maksymalny poziom drgań :  
0,68 mm/s

# Przykład II. Warstwa ceramiczna

Przekładnia typ WD 850 produkcji BEFARED

Poziom hałas – 107 dB

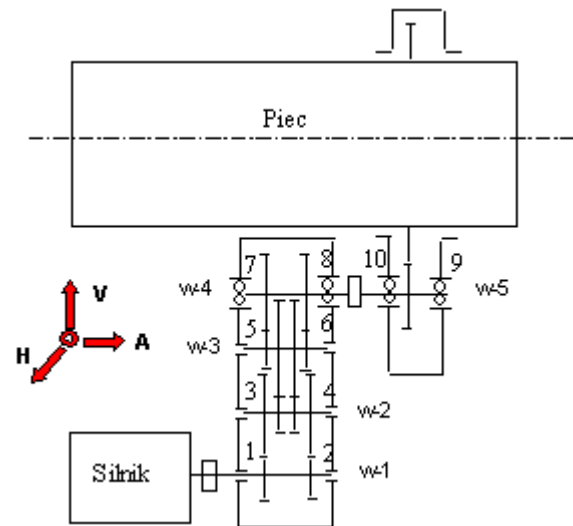
Po zastosowaniu środka TES-17 zmniejszenia hałasu do 97m dB

Środek TES-17 w przekładni powoduje :

1. Wytworzenie na współpracującej powierzchni zębów powłoki ceramiczno-metalowej, podlegającej w procesie tworzenia samodogładzaniu. Powstająca ceramiczno-metalowa powłoka wyrównuje na powierzchni zębów mikropełnięcia, rysy i wyłuszczenia oraz deformacje powierzchni zęba.
2. Obniża głośność pracy przekładni, poziomu drgań, temperatury pracy, wstrzymuje pitting

# Przykład III diagnostyki przekładni

Napęd pieca obrotowego w cementowni



Wystąpienie w punkcie 9V  
Drgań o poziomie 12,4 mm/s

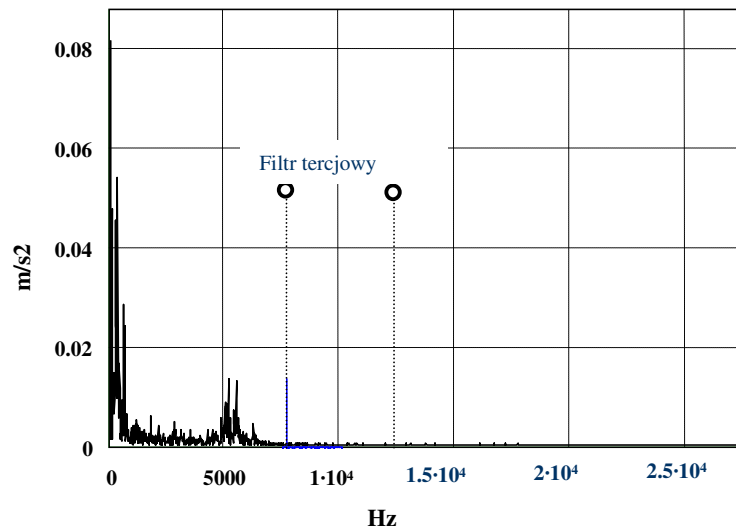
stopnie			wały			Zazębienie	
Nr stopnia	zębnek	koło	Nr wału	obr/min	[ Hz ]	Nr pary	[ Hz ]
z-1	30	151	w-1	867,000	14,450	z-1	433,5
z-2	34	139	w-2	172,252	2,871	z-2	97,6
z-3	39	139	w-3	42,133	0,702	z-3	27,4
z-4	25	146	w-4	11,822	0,197	z-4	4,9
			w-5	2,024	0,034		

# Parametry oceny

Nr. punktu	Kierunek	v rms mm/s	współcz. szczytu	a rms m/s <sup>2</sup>	Współ. szczytu	Kurtoza	wsółcz. pittingu	współcz. wyłamania
1	V	3,10	1,96	4,87	1,78	4,14	0,89	0,76
2	V	5,49	1,55	5,92	1,82	3,99	0,96	0,92
3	V	1,61	1,83	4,91	1,83	3,38	1,42	0,92
4	V	2,35	2,12	4,50	1,88	3,17	1,04	1,1
5	V	1,97	2,01	4,89	1,89	3,82	1,19	1,22
6	V	0,02	1,79	0,05	1,89	7,84	0,08	0,82
7	V	3,95	1,64	5,47	1,94	3,54	1,00	0,86
8	V	2,03	1,84	3,76	2,06	3,55	1,08	0,75
9	V	12,39	1,46	3,61	1,79	9,32	0,04	0,93
10	V	4,94	1,65	2,88	1,78	33,68	0,09	0,87



# Wybór pasma analizy



Pasmo analizy : 500-1000 obr. wału

Czas pomiaru : 10-50 okresu obrotu wału

Filtr tercjowy o paśmie  
12 kHz

Częstotliwości uszkodzenia  
Elementów łożyska 23080

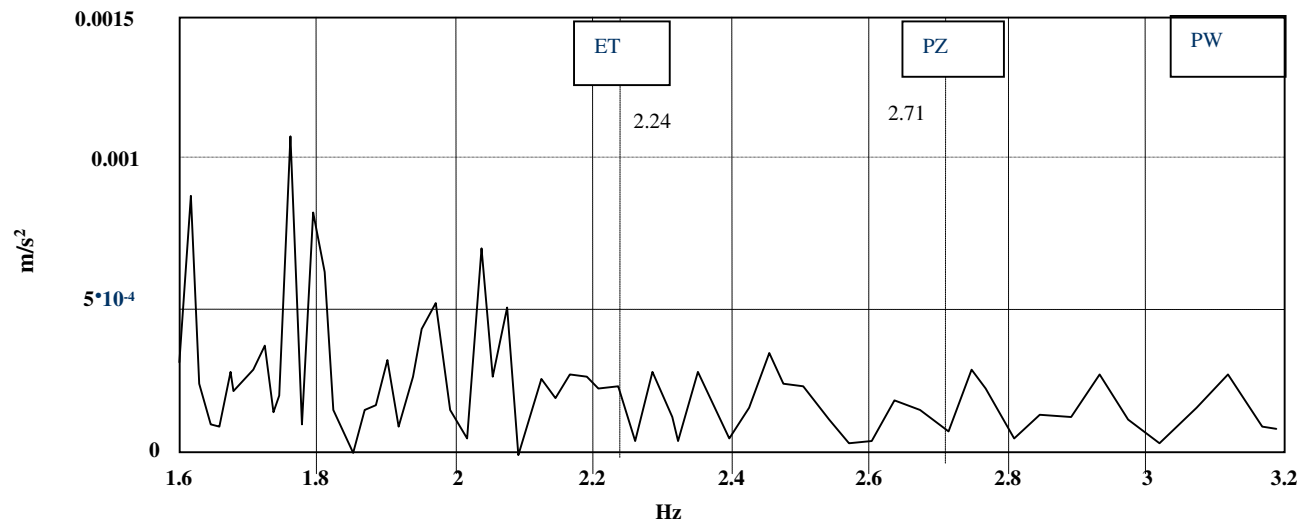
PZ – 2,71 Hz

PW- 3,20 Hz

ET – 2,24 Hz

KO – 0,20 Hz

# Widmo obwiedni



Wniosek : brak oznak uszkodzenia łożyska

# Diagnoza :

Silny pitting na stopniu drugim przekładni

Pitting na stopniach : 3 i 4

Przyczyna wzrostu poziomu drgań :

Przenoszenie się drgań ze stopnia drugiego na łożyska stopnia 5, spowodowane dużym stopniem zużycia zębów pittingiem.

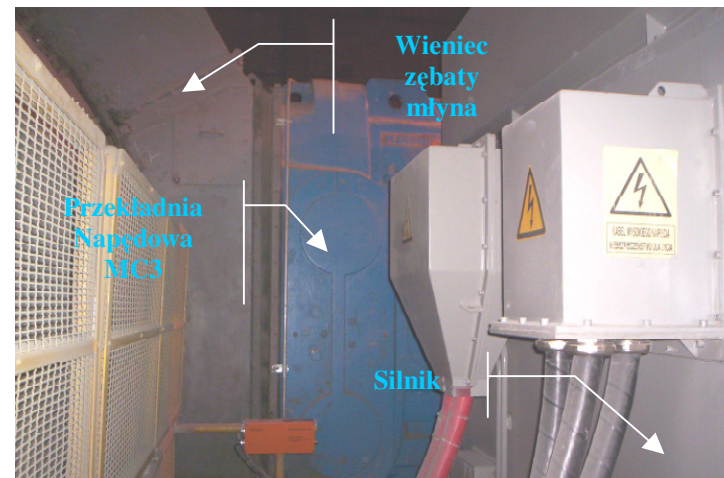
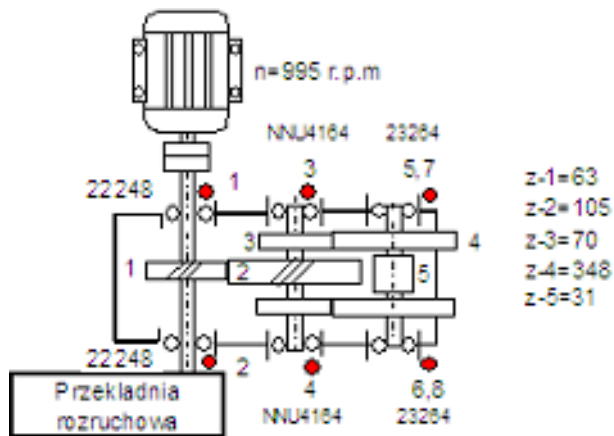
Zalecenia :

Zmniejszyć obciążenie przekładni do nastawy 60 %

Skutek : zmniejszenie poziomu drgań do wielkości 6-7 mm/s

# Przykład IV diagnostyki przekładni uszkodzenie łożyska

System VIBCOM wskazał na okresowe przekroczenie wartości Progowej ostrzeżenia przekładni napędu młyna cementu

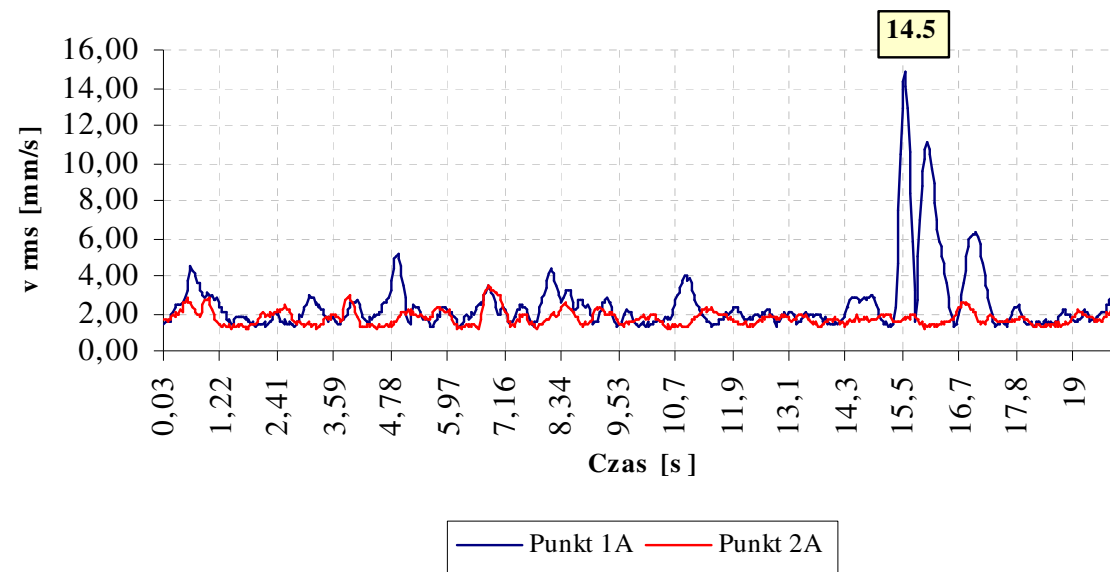


# Ocena I

<i>Stan maszyny</i>			<i>Maksymalna wartość</i>		<i>Podstawa oceny</i>			
stan dopuszczalny			V <sub>max</sub> = 0,0		wg.PN-ISO 8579-2 VR 5: do 5 mm/s Przemysł klasa C			
<i>Obliczone parametry RMS prędkości : v [ mm/s ]</i>								
<b>P-kt pom</b>	<b>Wartość Średnia</b>	<b>Wartość Max</b>	<b>Wsp. Szczytu</b>	<b>P-kt pom.</b>	<b>Wartość Średnia</b>	<b>Wartość Max</b>	<b>Wsp. Szczytu</b>	
1H	3,60	17,40	4,83	5H	2,42	4,95	2,04	
1V	2,76	11,40	4,14	5V	2,19	2,88	1,32	
1A	2,51	14,80	5,90	5A	1,99	2,72	1,37	
2H	2,07	3,24	1,56	6H	2,98	3,9	1,3	
2V	1,65	2,57	1,56	6V	1,84	2,54	1,38	
2A	1,75	3,43	1,96	6A	2,15	2,79	1,30	
3H	3,05	14,60	4,79	7H	2,48	4,07	1,64	
3V	1,92	2,60	1,36	7V	2,27	3,35	1,48	
3A	2,60	25,70	9,87	7A	2,26	3,39	1,50	
4H	2,42	3,16	1,30	8H				
4V	1,61	2,32	1,45	8V				
4A	1,84	2,48	1,35	8A				

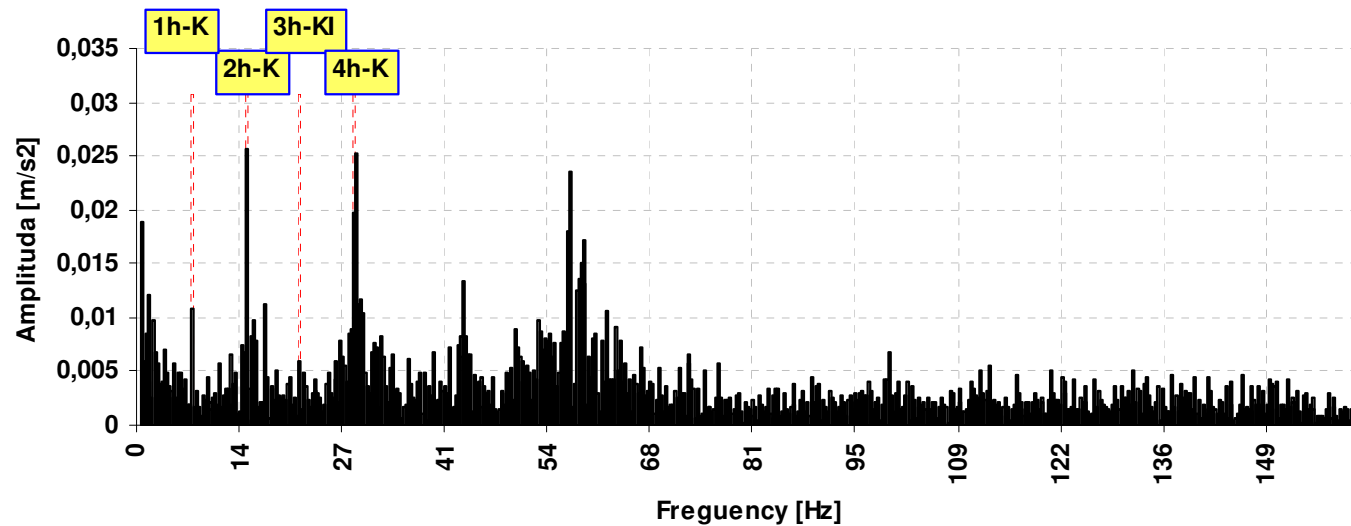
# Ocena II

Punkt 1A i 2A



# Ocena III

Punkt 1H. Widmo obwiedni



Wynik oceny : Uszkodzony koszyk łożyska nr.1 (22248)



**KONIEC**

**Dziękuję za uwagę**