

**Jerzy TOMASZEWSKI**  
CENTRUM MECHANIZACJI GÓRNICTWA KOMAG

## Układ do ciągłego monitorowania stanu technicznego przekładni zębatych

Dr inż. Jerzy TOMASZEWSKI

Urodzony w 1952 r. Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Pracę doktorską obronił w 1997 roku na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych w zakresie diagnostyki przekładni zębatych. Autor 60 publikacji w zakresie wibroakustycznej diagnostyki maszyn. Pracownik OBR Redor w Bielsku-Białej do 2005 r., następnie Centrum Mechanizacji Górnictwa Komag w Gliwicach - do 2006 r.



e-mail: zentjit@neostrada.pl

### Streszczenie

W pracy zaprezentowano doświadczalną metodę wyznaczania diagnostycznych parametrów przekładni. Do analizy wykorzystano moduł pomiarowy Vibrex oraz własny system ekspercki. Badania doświadczalne przeprowadzono w warunkach przemysłowych.

**Słowa kluczowe:** temperatura, drgania, system ekspercki, badania doświadczalne.

### System for continuous measurement of technical state of cylindrical gears

#### Abstract

In the paper the experimental method of measurements of diagnostics parameters are presented. For analysis the Vibrex module and expert system are used. The experimental investigations were performed in service (industrial) conditions.

**Keywords:** temperature, vibration, expert system, experimental investigations.

### 1. Wstęp

Powszechnie stosowanymi urządzeniami do diagnostyki stanu technicznego maszyn wirujących na rynku polskim są urządzenia firm Pruftechnik (Vibrocord, VibrotypP, SPM Instrumentms), tester impulsów uderzeniowych T200, T20012 czy też analizator impulsów uderzeniowych A2010. Wspólną cechą tych urządzeń jest to, że posiadają wszystkie potrzebne funkcje pomiarowe i próbki sygnału, jednakże nie precyzują szczegółowych instrukcji do diagnozowania urządzeń takich jak przekładnie zębate ogólnego przeznaczenia. W literaturze naukowej dotyczącej diagnostyki przekładni spotyka się wiele metod diagnozowania jej stanu [1, 2, 3, 4], przy wykorzystaniu różnorodnych technik analizy sygnałów drganiowych. Jednakże metody te z reguły weryfikowane były na specjalnych stanowiskach, w większości przypadków na przekładniach jednostopniowych o zębach prostych. Praktyka diagnozowania przekładni przemysłowych pokazuje, że w wielu przypadkach skuteczność metod jest niezadowalająca lub wręcz niemożliwa do realizacji w warunkach przemysłowych. Z tego powodu podjęto próbę opracowania metodologii i wykonania wersji przemysłowej elektronicznego urządzenia Vibrex przeznaczonego do diagnostyki on-line przekładni zębatych.

### 2. Opis modułu pomiarowego

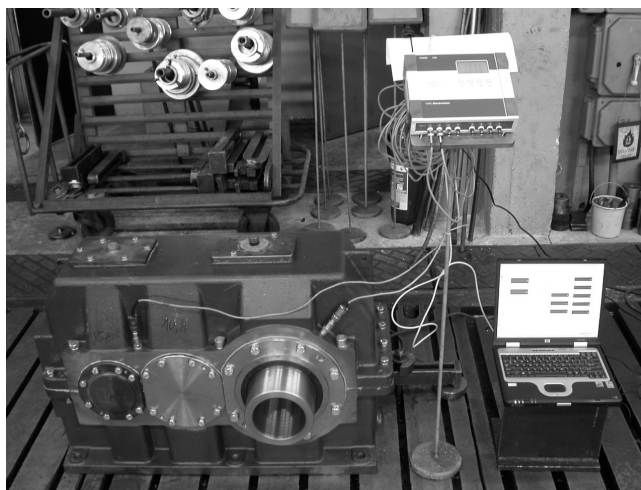
Moduł pomiarowy składa się z dwóch elementów: z elektronicznego układu do ciągłego monitorowania stanu przekładni, którego zadaniem jest wykrywanie wszelkich zmian w pracy przekładni, na podstawie maksymalnych amplitud składowych widma drgań z wielkościami progowymi. Drugim elementem jest

program komputerowy na PC do wykrywania miejsca i rodzaju uszkodzenia przekładni.

Na rysunku 1 pokazano moduł podczas badań stanowiskowych, przekładni produkowanej przez Redor S-ka z o.o, na stacji prób w Bielsku-Białej.

Moduł Vibrex to samodzielne, modułowe od 4 do 8 kanałów urządzenie do ciągłego monitorowania oraz wibrodiagnostyki przekładni zębatych ogólnego przeznaczenia. Zastosowanie urządzenia umożliwia ocenę stanu technicznego przekładni w oparciu o pomiar generowanych przez nie sygnałów drganiowych. Wejścia pomiarowe modułu Vibrex mogą być w prosty sposób przystosowane do rodzaju stosowanych czujników. Vibrex obsługuje wszystkie czujniki standardu ICP<sup>®</sup>, oraz napięciowe czujniki piezolaninowe. Urządzenie umożliwia pomiar przyspieszenia, prędkości oraz przemieszczenia drgań i widma w pasmach oktaowych. Wejściowy sygnał wibrodiagnostyczny poddawany jest filtracji (filtr przepustowy: 10 Hz - 1 kHz), a następnie zostają wyznaczone estymaty sygnału: wartość skuteczna (RMS) lub wartość szczytowa (0-Peak lub Peak-Peak).

Równolegle wyznaczane jest widmo drgań sygnału wejściowego w paśmie od 2 do 20 kHz.



Rys. 1. Moduł pomiarowy podczas testowania przekładni trzystopniowej  
Fig. 1. Test stand with registration system

Wyznaczane są również dla widma sygnału automatycznie wartości progowe (dla przekładni pracującej bez usterek) przez zadany okres eksploatacji.

Moduł realizuje następujące funkcje:

1. pomiar 4 kanałów sygnałów pochodzących z czujników drgań z wyjściem napięciowym
2. agregacja sygnałów (moduł posiada wewnętrzną pamięć RAM oraz pamięć FLASH do przechowywania wyników pomiarów)
3. umożliwia włączenie do nadrzędnego systemu sterowania poprzez udostępnienie interfejsu sieciowego ETHERNET 10/100 MB
4. wizualizację sygnałów pomiarowych oraz estymat parametrów tych sygnałów poprzez wyświetlacz LCD
5. synchroniczne wykonywanie pomiarów przy częstotliwości do 50kHz
6. umożliwia zmianę częstotliwości próbkowania
7. regulowana czułość torów wejściowych (x1, x10, x100)
8. diagnostyka układu na podstawie estymat parametrów sygnałów pochodzących z czujników

9. zabezpieczenie urządzeń zewnętrznych poprzez wyjścia przełącznikowe:

10. każde z wejść pomiarowych posiada dwa styczniki

11. jeden stycznik uruchamiany jest w przypadku wystąpienia stanu ostrzeżenia

12. drugi w przypadku wystąpienia stanu alarmowego

Do budowy układu wykorzystano mikrokontroler EP9302 oparty na technologii ARM920T 32-bitowy procesor o właściwościach:

1. Częstotliwość taktowania 200MHz

2. 16 KB instruction cache

3. 16 KB data cache

4. Częstotliwość magistrali systemowej 100Mhz

5. Optymalizowane instrukcje zmiennoprzecinkowe

6. Praca pod wbudowanym systemem operacyjnym np. Linux

7. 10/100 Mbps Ethernet MAC

Przetwornik ADC 24-bitowy przetwornik delta-sigma ADS1240 firmy Texas Instruments:

1. zmienna częstotliwość próbkowania

2. wewnętrzny filtr cyfrowy

3. synchronizowany zewnętrznym sygnałem

4. możliwość wyboru kanału

Wyświetlacz ciekłokrystaliczny o rozdzielczości 128 x 64 pokazano na rys. 2.



Rys.2. Wyświetlacz ciekłokrystaliczny modułu pomiarowego  
Fig. 2. Display of measurement module

Każdy z 4 torów kondycjonowania sygnałów wejściowych wyposażony jest w:

1. wzmacniacz o regulowanym wzmacnieniu (x1, x10, x100)

2. włączany/ wyłączany filtr dolnoprzepustowy

3. włączany/ wyłączany filtr górnoprzepustowy

4. Pamięć RAM - 4 MB pamięci danych dla aplikacji użytkownika.

5. Pamięć FLASH - 32 MB pamięci FLASH przeznaczonej pod system operacyjny oraz dane aplikacji użytkownika.

6. Złącza zasilania, sygnałowe oraz interfejsowe:

Wykorzystane będą złącza typu SMS QIKMATE

- zasilanie SMS3GE5

- sygnałowe SMS12GE5 lub 2xSMS6GE5

- złącza światłowodowe typu SMA dla ETHERNETU

- złącza elektryczne dla ETHERNETU – RJ45 lub DB9

Wyniki pomiarów estymat zapisywane są w pamięci FLASH z zadaniem interwałem rejestracji. Charakterystyki czasowe w ilości 262144 próbki na kanał są również zapisywane z zadaniem interwałem czasowym. Dane wymieniane są z komputerem PC przez komunikację cyfrową USB.

Drugim elementem układu jest program komputerowy umożliwiający na podstawie analizy składowych widma sygnału i jego obwiedni diagnozować miejsce i rodzaj uszkodzenia przekładni. Interfejs programu składa się z trzech okien. W oknie pierwszym

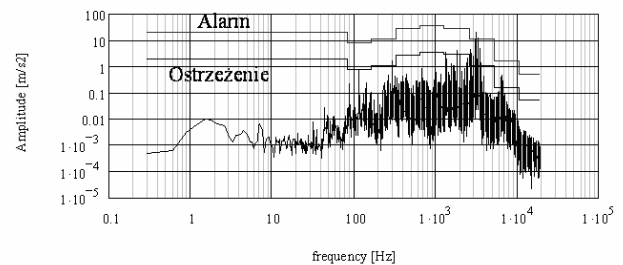
(rys. 3) podaje się dane kinematyczne przekładni oraz częstotliwości charakterystyczne uszkodzenia elementów łożysk tocznych.

Częstości drgań łożysk przy 60 obr./min		Częstości [Hz]	
wałek	łożysko	wałek	łożysko
wałek 1	11,377	16,417	113,702
wałek 2	12,873	4,364	35,138
wałek 3	15,345	1,660	16,887
wałek 4	12,000		
wałek 5	12,000		

Rys. 3. Wygląd okna do wczytywania danych kinematycznych badanej przekładni  
Fig. 3. Sample application window with data's of measurement gears

Wczytuje się również z pliku tekstowego lub wpisuje się w odpowiednie okno wartości progowe widma drgań w pasmach oktaowych.

W oknie dolnym po wczytaniu pliku z charakterystyką czasową z modułu Vibrex, pokazane jest widmo wraz z zaznaczonymi kolorami progami dopuszczalnymi w danym paśmie. Zaznaczone są również kolorami charakterystyczne częstotliwości węzłów kinematycznych przekładni (wg. rys. 4).



Rys. 4. Widmo drgań przekładni na tle progów ostrzegawczych  
Fig. 4. Spectral vibration of gears

W oknie trzecim, po wyborze analizowanego stopnia, zadawane są pytania związane z występowaniem określonych składowych widma, oraz zakresu pasma, w których zostały przekroczone wartości progowe. Odpowiedzi udziela się twierdzącej lub przeczącej na zadawane pytania. Końcowym efektem jest wskazanie na rodzaj i miejsce defektu przekładni (wg. rys. 5).

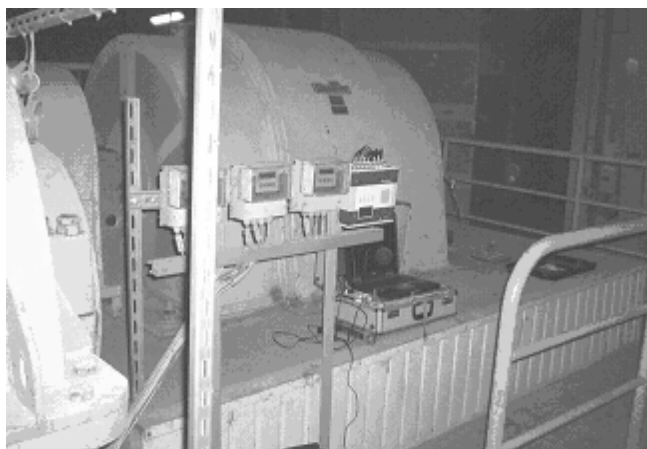
Badana przekładnia:  
ANALIZA PIERWSZEGO STOPNIA PRZEKŁADNI  
Czy wzrosło widmo wysokiej częstotliwości (>3kHz)? NIE  
Czy występują wysokie wielokrotności częstości obrotowych wałków? NIE  
Czy występują wielokrotności częstości ząbień? TAK  
==> 5. Defekt ząbień

1 stopień **KONIEC LISTY PYTAŃ**  
 2 stopień  
 3 stopień  
 4 stopień

[NIE] [TAK]

Rys. 5. Okno programu do ustalania rodzaju defektu na podstawie zadawanych pytań  
Fig. 5. Sample application window of expert system

Na rysunku 6 pokazano moduł zamontowany na przemysłowej przekładni napędu młyna surowca w Cementowni Dyckenhoff Polska w Nowinach.

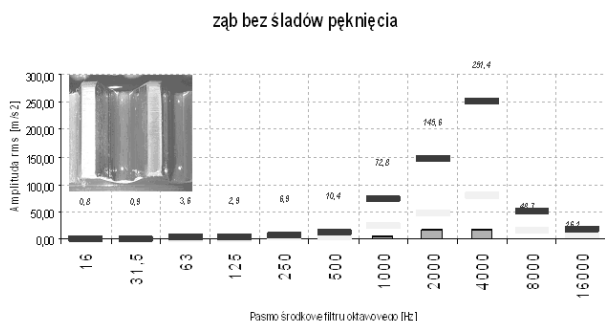


Rys. 6. Moduł Vibrex diagnostyczny stan techniczny przekładni w napędu młyna surowca

Fig. 6. Vibrex module for measurement of technical state of gear box

Podczas testowania pracy modułu Vibrex w warunkach przemysłowych, wykryto niesprawność przekładni związanej z ząbieniem pierwszego stopnia przekładni. Moduł ekspercki bezbłędnie określił miejsce i rodzaj uszkodzenia przekładni. Po zastosowaniu specjalnego dodatku do oleju pod handlową nazwą Ceramizer, zahamowano proces zużycia zębów pierwszego stopnia, co pozwoliło na pracę przekładni do momentu planowanego postępu cementowni. Moduł ten może również wykrywać uszkodzenia elementów łożysk tocznych. Procedurę wykrywania uszkodzeń elementów łożysk przedstawiono w poz. [5]. Jedną z ważniejszych cech modułu jest zdolność do wykrywania skąpego smarowania łożysk i ząbienia. Jest to szczególnie ważne w przypadku przekładni z natrykowym sposobem smarowania, gdzie często występuje zjawisko zatykania się przewodów doprowadzających olej do tych węzłów. Skutki tego procesu opisano w poz. [6].

Jako przykład możliwości diagnozowania stanu technicznego przekładni przy pomocy modułu Vibrex na rysunkach 7, 8 pokazano wartości amplitud drgań w pasmach oktawowych dla przekładni z zębem bez oznak wyłamania i z pęknięciem na całej szerokości wrębu zęba.

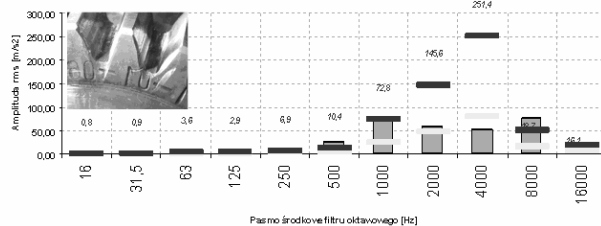


Rys. 7. Wartości maksymalnych amplitud drgań w pasmach oktawowych dla przekładni pracującej bez uszkodzonego zęba

Fig. 7. Maximal values of vibration amplitude for gear without damage of tooth

Wartości amplitud w przypadku wystąpienia pęknięcia wzdłużnego jego podstawy przekraczają progi alarmowe. Zostały one wyznaczone automatycznie przez moduł w trybie „uczenia”, podczas pracy przekładni z obciążeniem nie powodującym zmęczeniowego pęknięcia zębów koła.

Pęknięcie wzdłuż szerokości zęba



Rys. 8. Wartości maksymalnych amplitud drgań w pasmach oktawowych dla przekładni pracującej z pęknięciem wzdłuż szerokości zębem w podstawie

Fig. 8. Maximal values of vibration amplitude for gear with damage of tooth

### 3. Wnioski końcowe

W wyniku realizacji projektu badawczego powstał przemysłowy prototyp urządzenia do ciągłego monitorowania stanu technicznego przekładni, zbudowany na podstawie opracowanej dokumentacji i oprogramowania mikroprocesora sygnałowego. Umożliwia to podjęcie produkcji przez dowolną małą firmę sprawdzonego urządzenia o koszcie wytworzenia konkurencyjnym w stosunku do wyrobów renomowanych europejskich firm (Schenk, Pruftechnik, SPM). Ponadto powstał program ekspercki pomocny dla potencjalnych użytkowników systemu w lokalizacji miejsca i rodzaju uszkodzenia elementu przekładni. Uniwersalność programu umożliwia jego zastosowanie również w połączeniu z innymi modułami pomiarowymi. Przykładem tego jest możliwość współpracy programu z modułem VibDAQ produkcji firmy EC Electronics, który przeznaczony jest do współpracy z dowolnym Laptopem z wejściem USB, wyposażonym w standardową kartę dźwiękową. Moduł ten przeznaczony jest do współpracy ze standardowymi czujnikami ICP lub innymi czujnikami z wyjściem napięciowym co z komputerem tworzy razem uniwersalny miernik poziomu drgań o bardzo dużych możliwościach pomiarowych. Doposażenie tego układu w opracowany program ekspercki, umożliwia tzw. obchodową diagnostykę maszyn wirujących. Cena takiego zestawu z profesjonalnymi miernikami tego typu jest minimum 15 krotnie niższa.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pt. Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008.

### 4. Literatura

- [1] C. Cempel: Diagnostyka Wibroakustyczna Maszyn. PWN Warszawa 1989
- [2] W. Hernandez, D. Evans: Advanced signal processing for fault detection in gearboxes with high background noise. In The TTCP Drive Train Monitoring Workshop. London, 18-21 June 1991
- [3] McFadden P.D : Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of meshing vibration. Transaction of the ASME. Journal of Vib. Acoustics, Stress and Rel. In Design No 108, 1986 pp. 165-170
- [4] J. Drewniak, J. Tomaszewski: Diagnostics Analysis of Pitting Phenomena Machine Dynamics Problems. Vol 15, 1996 pp. 21-33
- [5] J. Tomaszewski: Wibroakustyczna diagnostyka stanu technicznego łożysk tocznych. Maszyny Górnicze 2/2006 str. 3 – 8
- [6] J. Tomaszewski, J. Kaczmarczyk: Zagrożenie wywołane wzrostem temperatury powierzchni przekładni zębatej pracującej w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa nr. 6/425 2006 r. str. 17-24