

diagnostyka, układy napędowe przenośnika taśmowego

Wojciech SAWICKI*, Radosław ZIMROZ*, Robert KRÓL*, Szymon DYK**

BADANIA DIAGNOSTYCZNE UKŁADÓW NAPĘDOWYCH PRZENOŚNIKÓW TAŚMOWYCH W WARUNKACH KOPALNI PODZIEMNEJ MIEDZI

W pracy przedstawiono proceduralne podejście w planowaniu eksperymentu biernego na potrzeby diagnostyki elementów układu napędowego przenośnika taśmowego pracującego w kopalni podziemnej miedzi. Wykazano konieczność uwzględnienia wielu czynników mających wpływ na postać sygnału które za wcześniejszymi pracami Bartelmusa podzielono na czynniki konstrukcyjne/technologiczne, eksploatacyjne i zmianę stanu. Przyjęcie takiej systematyki umożliwiło zaproponowanie pewnej procedury postępowania dotyczącej planowania eksperymentu diagnostycznego (ustalenie liczby torów pomiarowych, rodzaju wielkości fizycznych i parametrów akwizycji itd.) i sprawdzenie poprawności uzyskanych danych.

1. WPROWADZENIE

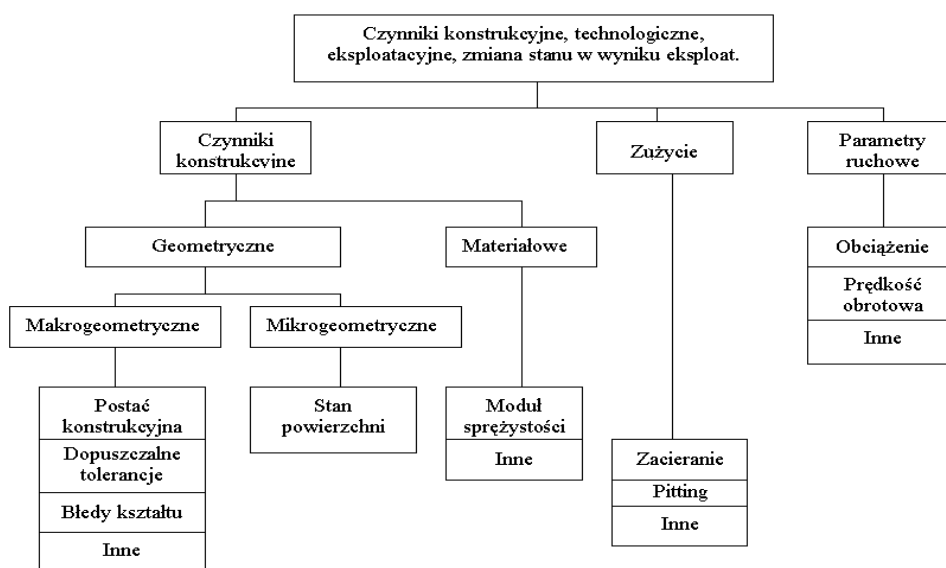
W pracy opisano procedurę badania diagnostycznego układów napędowych przenośnika taśmowego w warunkach kopalni podziemnej. Uwzględnienie wzajemnych interakcji pomiędzy elementami systemu, wpływu czynników konstrukcyjnych i warunków eksploatacyjnych na postać sygnału (jak postulowano w pracach Bartelmusa [1], dotyczących elementów maszyn górnictwa odkrywkowego – rys. 1) narzuca pewną złożoność procedury rejestracji sygnałów. W niniejszym opracowaniu przedstawiono przykładowe odpowiedzi na fundamentalne pytania dotyczące pierwszego etapu procesu diagnozowania tj. przygotowania eksperymentu i rejestracji sygnałów diagnostycznych (obejmujących zagadnienia doboru

* Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, pl. Teatralny 2, 50-051 Wrocław,
e-mail: wojciech.sawicki@pwr.wroc.pl

** KGHM Polska Miedź S.A., O/ZG Polkowice-Sieroszowice

odpowiednich torów pomiarowych, czujników, lokalizacji punktów pomiarowych, warunków eksploatacyjnych itd.).

W celu zapewnienie proceduralnego charakteru postępowania wykorzystano koncepcję zaproponowaną przez Bartelmusa [1] polegającą na uwzględnieniu czynników konstrukcyjnych/technologicznych, eksploatacyjnych i zmiany stanu w procesie diagnozowania. Pozwala to na powiązanie uzyskiwanych wyników z fizycznymi parametrami badanego układu.



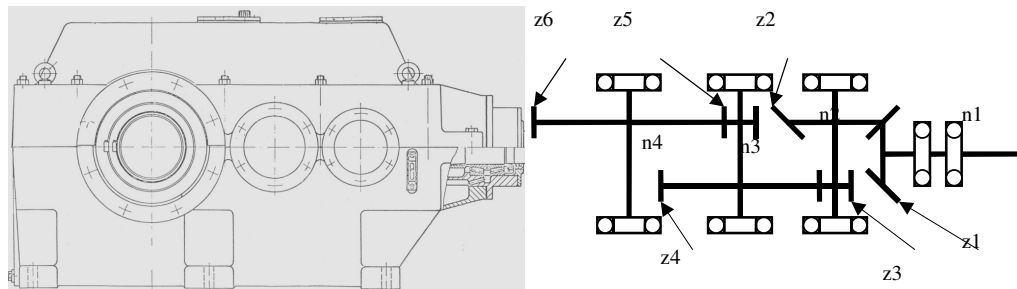
Rys. 1. Podział czynników wpływających na postać sygnału diagnostycznego [1]

Fig. 1. Factors and their influence on diagnostic signal [1]

2. OPIS OBIEKTU

Przedmiotem badań diagnostycznych są elementy układu napędowego przenośników taśmowych odstawy głównej typu LEGMET 1200 o nr L-204 i L-210. Przenośnik L-210 zabudowany jest w wyrobisku o nachyleniu $2^{\circ}30'$ i zasilany jest zbiornikiem U-15, który obsługuje przenośniki z trzech oddziałów wydobywczych G-53, G-61 i G-62. Zainstalowane są tu 4 jednostki napędowe, każda o mocy 160 kW. Przenośnik L-204 pracuje w wyrobisku poziomym, przejmuje urobek z przenośnika oddziałowego L-207, a jego układ napędowy liczy 2 jednostki po 160 kW. Szczegółowej analizie poddano przekładnie zębate KUMERA TKJ-3400 oraz łożyska baryłkowe 22248W33 stosowane do łożyskowania bębnow napędowych. Obiekty te pracują w szerokim zakresie obciążeń, w niekorzystnych warunkach kopalni podziemnej miedzi (wysoka temperatura, wilgoć).

Przekładnia TJK-3400 o przełożeniu 19,5:1 posiada 3 stopnie, pierwszy stopień jest stożkowy a dwa kolejne walcowe (rys. 2). Obciążenie zewnętrzne przekładni zależy od strumienia urobku na taśmie.



Rys. 2 Przekładnia TJK-3400 – widok ogólny i schemat przekładni
Fig. 2. Gearbox TJK-3400 – side view and cinematic scheme

Cechy konstrukcyjne (liczby zębów, wymiary łożyska, liczba elementów toczy, prędkości poszczególnych wałów itd.) i parametry eksploatacyjne (rzeczywista wartość prędkości wału wejściowego i wartość obciążenia) niezbędne do wyznaczenia charakterystycznych częstotliwości w przekładni zamieszczono w tabelach 1–3. Ze względu na fluktuacje prędkości wyznaczono także częstotliwości wyrażone w rzędach (w tym przypadku są to wielokrotności częstotliwości wału wejściowego). Wyznaczenie charakterystycznych częstotliwości zazębień wałów, częstotliwości uszkodzeń w łożyskach, pozwala na oszacowanie zakresu analizowanych częstotliwości, częstotliwości próbkowania, rozdzielczości widma i minimalnego czasu pomiaru (długości sygnału). Na czas trwania pomiaru może mieć wpływ także zmienność obciążenia (jeśli jest okresowa) – czynnik eksploatacyjny.

Tabela 1. Ilości zębów na poszczególnych kołach zębatych
Table 1. Wheels and corresponding number of teeth

koło	ilość zębów
z1	23
z2	41
z3	24
z4	67
z5	20
z6	78

Tabela 2. Prędkości obrotowe wałów
Table 2. Rotational speed of shafts

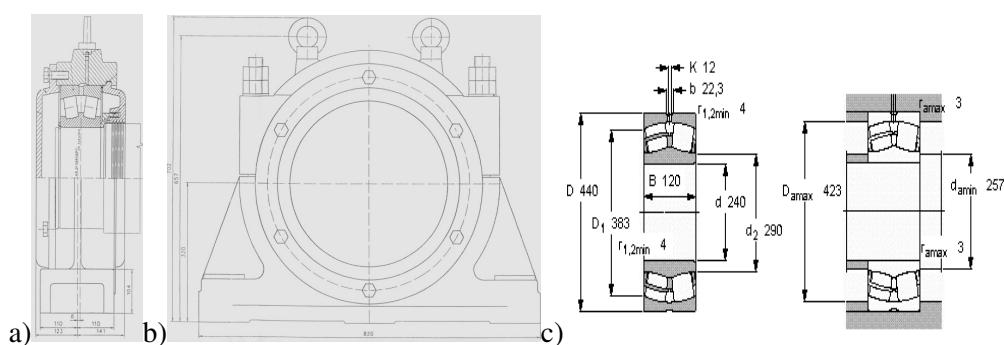
wał	N [rpm]	f [Hz]	rzęd
n1	940	15,67	1
n2	527,3171	8,79	0,560976
n3	188,8897	3,15	0,200946
n4	48,43326	0,81	0,051525

Tabela 3. Częstotliwości ząbienia wyrażona w hercach [Hz] i w rzędach (order)
 Table 3. Meshing frequency expressed in Hertz [Hz] and orders

częstotliwości ząbienia	[Hz]	rzęd
f12	360,33	23
f34	210,93	13,46341
f56	62,96	4,01893

Badane łożysko 22248W33 jest łożyskiem dwurzędowym baryłkowym. Średnica wewnętrzna wynosi 240 mm, zewnętrzna 440 mm, szerokość 120 mm. Dopuszczalne obciążenia dynamiczne i statyczne to odpowiednio: 2200 kN i 3000 kN. Prędkość obrotowa 1300 obr/min, prędkość obrotowa maksymalna 1800 obr/min, a masa wynosi 83 kg.

Analogicznie jak dla przekładni, wykorzystano informacje o cechach konstrukcyjnych łożyska i wykonano (przy pomocy programu ze strony internetowej firmy SKF) obliczenia częstotliwości charakterystycznych tych łożysk, a następnie oszacowano parametry rejestracji. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 4. Należy dodać że w przypadku łożysk istotne jest także oszacowanie częstotliwości rezonansowej.



Rys. 3 łożysko baryłkowe 22248W33: a) w przekroju poprzecznym; b) w obudowie; c) wymiary łożyska
 Fig. 3. Spherical roller bearings type 22248W33: a) in cross-section; b) in housing; c) dimensions

Tabela 4. Częstotliwości charakterystyczne łożyska 22248W33 przy prędkości obrotowej bieżni zewnętrznej 48,4obr/min i nieruchomej bieżni wewnętrznej
 Table 4. Frequency of one-point fault in inner and outer race of spherical roller bearings type 22248W33

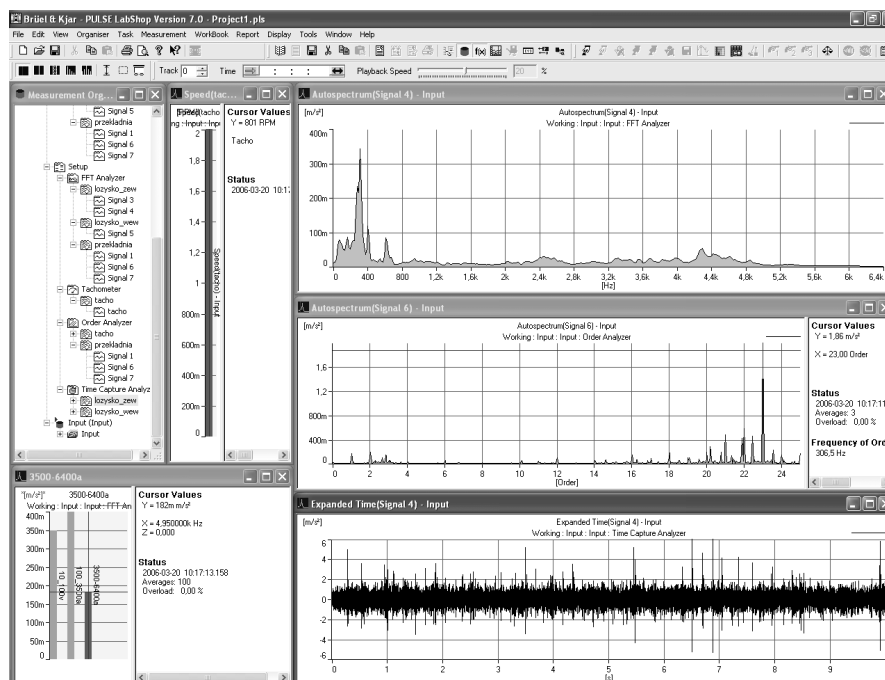
Rodzaj uszkodzenia	f [Hz]
Częstotliwość uszkodzenia bieżni wewnętrznej	8,75
Częstotliwość uszkodzenia bieżni zewnętrznej	6,58
Częstotliwość uszkodzenia elementu tocznego	5,47

2. SYTEMY I URZĄDZENIA POMIAROWE

W ramach eksperymentu wykonano serię pomiarów obejmujących rejestrację prędkości obrotowej wału wejściowego, sygnałów drganiowych w 6 punktach pomiarowych na przekładni (3 pkt) i łożysku (3pkt), pomiary temperatury obudowy przekładni w punktach zbierania sygnału drganiowego oraz dokonywano odczytu wartości prądu pobieranego przez układ napędowy przenośnika.

2.1. REJESTRACJA PRZYSPIESZEŃ DRGAŃ

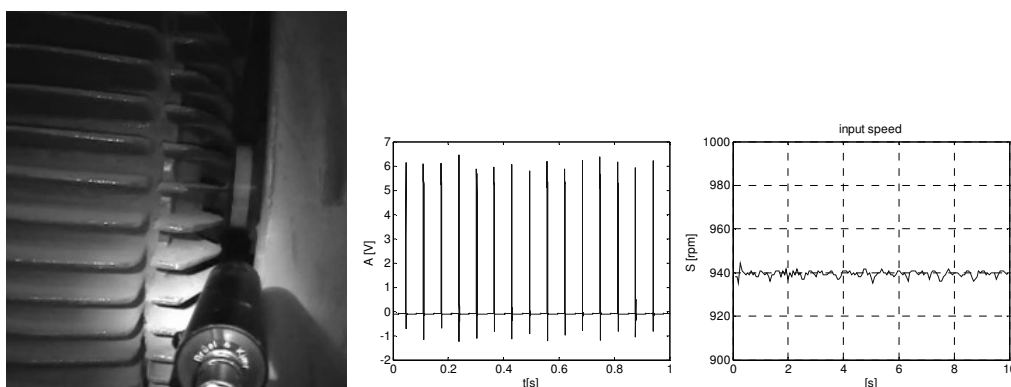
Pomiary drgań zostały wykonane za pomocą analizatora Pulse wyposażonego w przenośną kasetę pomiarowa 3560C wraz z 6 kanałowym modulem 3032A i pięciu akcelerometrów Endevco 751-10 o nr fabr. 13263, 13264, 13265, 13266, 13267. Cały tor pomiarowy był wzorcowany przed i po każdej serii pomiarów kalibratorem drgań typ K-10, nr fabr. 082, wytwórca EMSON MAT (świadcstwo uwierzytelnienia wydane przez Okręgowy Urząd Miar we Wrocławiu, nr 264U-W5-2003). Na potrzeby eksperymentu stworzono tzw. projekt pomiarowy w środowisku PULSE (zob. rys. 4).



Rys. 4. Widok aplikacji pomiarowej
Fig. 4. Main screen of measuring system

2.2. REJESTRACJA PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ

Rejestracji chwilowej prędkości obrotowej dokonano wykorzystując sondę tachometryczną. Pomiar prędkości realizowany jest poprzez przetwarzanie w systemie PULSE sygnałów optycznych wysyłanych przez sondę, a następnie odbitych od zamocowanej na wale wejściowym taśmy odbijającej sygnały optyczne i rejestrowanych przez sondę. Przykładowy sygnał tachometryczny i wyznaczony na jego podstawie tzw. profil prędkości pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Sonda TACHO typ MM0024; po lewej stronie – podczas pomiaru obrotów wału silnika elektrycznego; w środku – sygnał tacho, po prawej – profil prędkości

Fig. 5. Tacho probe type MM0024 (on the left); tacho signal in the middle; speed profile on the right

2.3. POMIAR OBCIĄŻENIA

Pomiar obciążenia był realizowany pośrednio poprzez odczyt wartości prądu pobieranego przez układ napędowy przenośnika. Rejestracja poboru prądu przypadającego na każdy silnik jednostki napędowej odbywała się przy wykorzystaniu systemu PROMOS (rys. 6). Jest to system przeznaczony do sterowania rozproszonymi procesami technologicznymi, a w szczególności do automatyzacji ciągów przenośników taśmowych.

2.4. POMIAR TEMPERATURY

Pomiary temperatury zostały wykonane na obudowie przekładni i łożyska w punktach zbierania sygnału drganiowego za pomocą pirometru (rys. 7). Pomiary zostały zrealizowane z dwóch powodów – jako dyskryminator stanu (wyraźnie podwyższona temperatura oznacza nieprawidłowy stan techniczny) oraz jako

parametr zapewniający powtarzalność warunków w czasie pomiaru sygnału drganiowego.



Rys. 6. Okno podglądu rejestracji poboru prądu na poszczególnych jednostkach napędowych przenośnika L-210

Fig. 6. Main screen of conveyor belt automation system

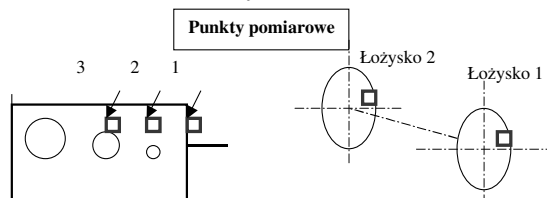


Rys. 7. Widok przyrządu do bezdotykowego pomiaru temperatury

Fig. 7. Device for distant measurement of temperature

3. DOBÓR PUNKTÓW POMIAROWYCH

W przypadku doboru punktów pomiarowych w przekładniach zębatych wykorzystano częściowo lokalizacje czujników zaproponowane przez Bartelmusa [1] do diagnozowania dwustopniowych przekładni napędu przenośnika w kopalni odkrywkowej. W przypadku łożysk tocznych istnieją 3 możliwe lokalizacje – w kierunku osiowym, pionowym i poziomym. Ze względu na ograniczoną liczbę torów pomiarowych wybrano kierunek pionowy, aczkolwiek na jednym z łożysk rejestrowano drgania także w kierunku poziomym. Nie zauważono zasadniczych różnic w przebiegu czasowym pomiędzy kierunkiem poziomym i pionowym. Lokalizacje czujników zilustrowano na rys. 8 i 9.



Rys. 8. Położenie punktów pomiarowych na przekładni i na obudowach łożysk bębnow
Fig. 8. The location of measurement points on gearbox and bearing's housing



Rys. 9. Położenie punktów pomiarowych: po lewej stronie – na przekładni w kierunku pionowym; po prawej stronie – na obudowach łożysk bębnow odpowiednio w kierunku pionowym i poziomym
Fig. 9. The location of measurement points on gearbox in vertical direction and on bearing housing in vertical and horizontal direction

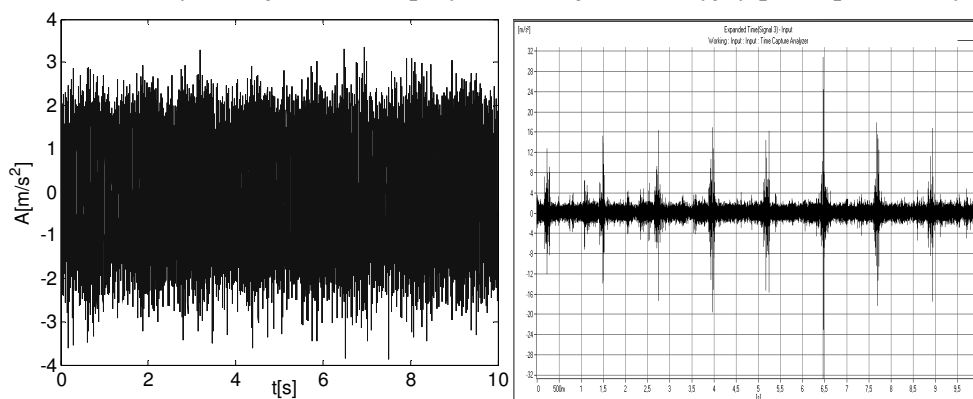
4. PRZYKŁADOWE WYNIKI POMIARÓW I ANALIZ

Celem przedstawionych wyników rejestracji i analiz nie jest podjęcie decyzji o stanie technicznym obiektu ale poznanie dynamiki sygnału, jego struktury, wzrokowa inspekcja stacjonarności, wybór bardziej informacyjnego punktu rejestracji sygnału itd.

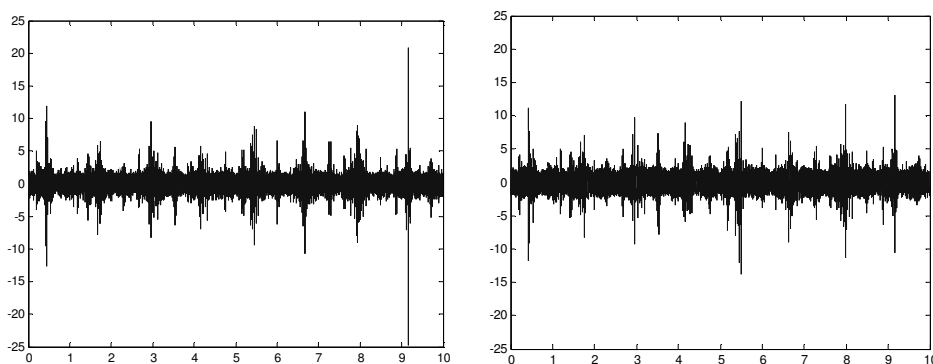
Jako podstawowe narzędzia wykorzystane zostaną analiza przebiegu czasowego, analiza widmowa i czasowo-częstotliwościowa [2].

Pokazane na rys. 10 przebiegi czasowe z przekładni i z łożyska pokazują zupełnie inną naturę tych sygnałów. Sygnał z przekładni jest stacjonarny, pozbawiony wyraźnych modulacji amplitudowej (objawiającej się jako wolnozmiennie fluktuacje amplitudy) natomiast sygnał z łożyska zawiera okresowe zaburzenia o charakterze lokalnym impulsowym co zwykle świadczy o wystąpieniu uszkodzenia w łożysku [3]. Sytuacja taka jest bardzo niekorzystna nawet jeśli występowanie impulsów nie jest związane z uszkodzeniem – krótkotrwały kilkukrotny wzrost amplitudy sygnału oznacza występowanie chwilowych przeciążeń co w krótkim czasie doprowadzi do uszkodzenia.

Rysunek 11 przedstawia porównanie sygnałów z łożyska zarejestrowanych w kierunku pionowym i poziomym. Na podstawie uzyskanych przebiegów trudno jednoznacznie wyselekcjonować „lepszy”, bardziej informacyjny punkt pomiarowy.

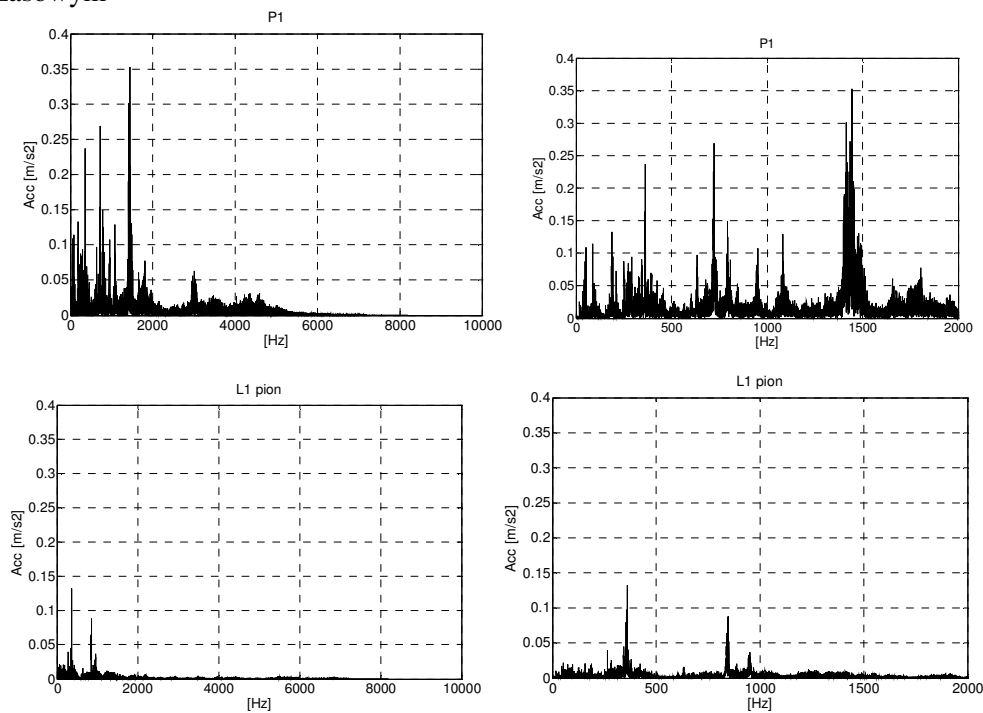


Rys. 10. Przykładowe zarejestrowane sygnały: po lewej – z przekładni; po prawej – z łożyska w bębnie
Fig. 10. Examples of signals in time domain from gearbox and bearing



Rys. 11. Przykładowe zarejestrowane sygnały z łożyska L2 w bębnie:
po lewej – w kierunku pionowym; po prawej – w kierunku poziomym
Fig. 11. Examples of signals in time domain from gearbox and bearing
in vertical and horizontal direction

Na podstawie widm (rys. 12) oraz map czasowo częstotliwościowych (rys. 15) można powiedzieć, że częstotliwość próbkowania została dobrana prawidłowo – powyżej 7 kHz amplitudy składowych sygnału z przekładni są znacznie niższe. Struktura częstotliwościowa dla sygnałów z łożysk jest zupełnie inna niż dla przekładni [4]. Wiadomo, że łożyska generują sygnał o charakterze szerokopasmowym (chyba, że są w nieodpowiednim stanie technicznym). Na podstawie widma oraz mapy t-f można zauważyć przenikanie sygnału z przekładni poprzez wał na łożysko co jest zjawiskiem niekorzystnym – zakłócenie sygnału mierzonego na łożysku drganiami z przekładni utrudnia ocenę stanu łożyska. Szczegółowa analiza spektrogramu wyznaczonego dla sygnału z łożyska pokazuje występowanie okresowych szerokopasmowych zaburzeń struktury widmowej co jest typowe dla wspomnianych wcześniej okresowych impulsów występujących w sygnale czasowym

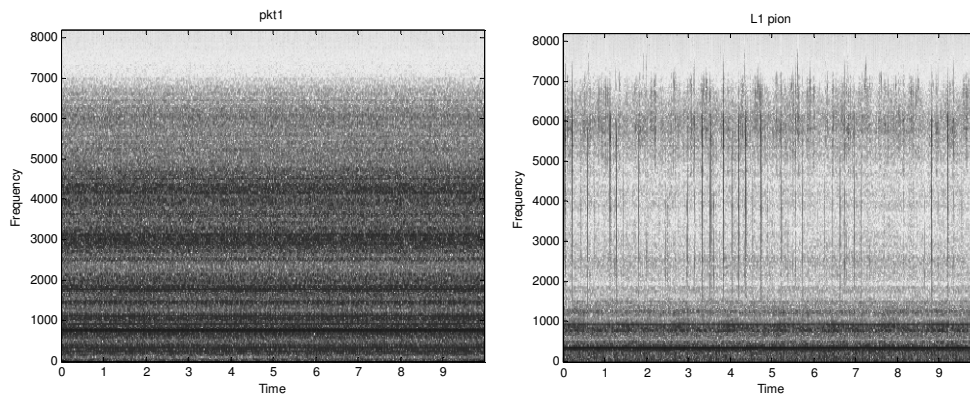


Rys. 12. Przykładowe widma sygnałów z przekładni i z łożyska.

Widoczne składowe to $f_{z12} = 360$ Hz i $4f_{z34} = 840$

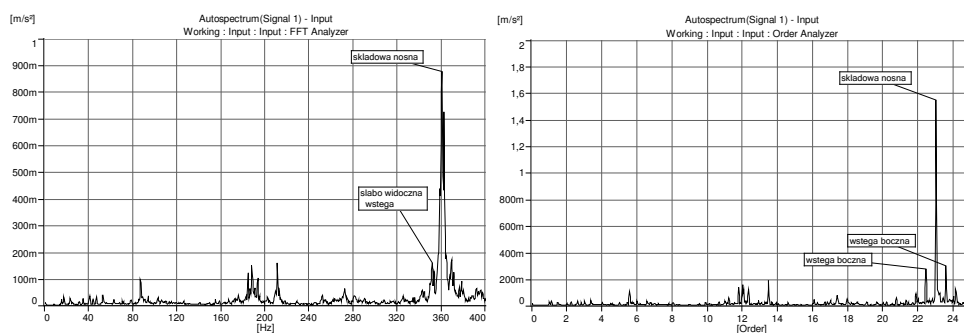
Fig. 12. Examples of spectrum of two signals with visible components

$f_{z12} = 360$ Hz and $4f_{z34} = 840$



Rys. 13. Przykładowe spektrogramy dla sygnału z przekładni zębatej i z łożyska
 Fig. 13. Examples of spectrograms of two signals from gearbox and bearing

Analiza widm sygnałów rozumiana jako identyfikacja częstotliwości i amplitud prążków o częstotliwościach charakterystycznych, ich harmonicznym i efektów modulacyjnych w warunkach zmiennego obciążenia nastęrcza pewnych kłopotów. Charakterystyczne rozmycie widma (zamiast jednego prążka widzimy grupę prążków skupionych wokół teoretycznego położenia składowej) jest efektem zmiennej prędkości obrotowej spowodowanej zwykle zmiennym obciążeniem chwilowym – czynnikiem eksploatacyjnym [5]. Analiza profilu prędkości uzyskanego na podstawie sygnału tacho (rys. 5) pozwala ocenić stacjonarność warunków eksploatacyjnych. Fluktuacje obciążenia i prędkości powodujące efekt rozmywania składowych utrudniają a nawet uniemożliwiają podjęcie prawidłowej diagnozy. Wykorzystanie toru pomiarowego z sygnałem tacho pozwala wykorzystać analizę rzędów, która eliminuje efekt rozmycia widma poprzez odpowiednie przepróbkowanie sygnału w cyklu obrotu wału [6]. Na rysunku 14 pokazano przykład klasycznego widma i widma rzędów.



Rys. 14. Klasyczne widmo FFT i widmo rzędów
 Fig. 14. Classic FFT spectrum and order spectrum

5. PROPOZYCJA PROCEDURY

W tym rozdziale zaproponowano sposób postępowania – planowania eksperymentu diagnostycznego i weryfikacji zarejestrowanych danych z uwzględnieniem czynników konstrukcyjnych, eksploatacyjnych i zmiany stanu.

Wpływ czynników konstrukcyjnych:

Na podstawie liczby zębów i znamionowej prędkości obrotowej wyznacz częstotliwości charakterystyczne:

- częstotliwości zazębienia każdego stopnia i ich 5 harmoniczych,
- częstotliwości wałów i ich 3 harmoniczne,

Na podstawie znamionowej prędkości obrotowej, geometrii łożysk i liczby elementów tocznych wyznacz:

- częstotliwości uszkodzenia bieżni wewnętrznej,
- częstotliwości uszkodzenia bieżni zewnętrznej,
- częstotliwości uszkodzenia elementu tocznego.

Numerycznie lub eksperymentalnie wyznacz rezonanse łożysk

Na podstawie rozwiązania konstrukcyjnego i dostępnej liczby kanałów ustal lokalizację punktów pomiarowych

Wpływ czynników eksploatacyjnych:

- ustal rzeczywistą wartość prędkości,
- ustal rzeczywistą wartość obciążenia,
- sprawdź czy wartość obciążenia jest równa lub zbliżona do wartości znamionowej,
- określ zmienność obciążenia/prędkości,
- ustal zakres analizowanych częstotliwości, wymaganą rozdzielczość, minimalny czas trwania pomiaru.

Wpływ zmiany stanu

- do wykrywania uszkodzeń rozproszonych o charakterze modulacyjnym zastosuj procedurę demodulacji,
- do wykrywania uszkodzeń lokalnych zastosuj procedurę demodulacji lub metody czasowo-częstotliwościowe,
- do wykrywania uszkodzeń rozproszonych o charakterze niemodulacyjnym (luzy, zużycie równomierne) w warunkach stacjonarnego obciążenia zastosuj analizy widmowe,
- do wykrywania uszkodzeń rozproszonych o charakterze niemodulacyjnym (zużycie nierównomierne) w warunkach niestacjonarnego obciążenia zastosuj analizę rzędów.

6. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule wyniki powstały częściowo w ramach realizacji pracy dyplomowej Dyka pod kierunkiem Sawickiego [7]. Badania diagnostyczne układów napędowych (obejmujące ocenę stanu technicznego wielostopniowej przekładni zębatej i bębna napędowego) w warunkach zmiennego obciążenia w niekorzystnym środowisku kopalni podziemnej to zadanie złożone. W celu zapewnienia pewnej proceduralności działań proponuje się zastosowanie podobnego podejścia jak dla układów napędowych przenośników pracujących w warunkach kopalni odkrywkowej. Wprawdzie powstawanie strumienia urobku odbywa się w inny sposób to jednak proponowany przez Bartelmusa podział czynników wpływających na postać sygnału może mieć tu zastosowanie. Uwzględnienie cech konstrukcyjnych, eksploatacyjnych oraz zmiany stanu pozwala określić prawdopodobne właściwości sygnału a co za tym idzie dobrać odpowiednie parametry rejestracji sygnału, punkty pomiarowe, metody wstępnego przetwarzania sygnału, ekstrakcji cech diagnostycznych i ich dalszej analizy w celu oceny stanu obiektu.

Mimo że celem tej pracy nie było przedstawienie ostatecznej diagnozy na podstawie prezentowanych wyników można powiedzieć że w jednym z badanych łóżysk występuje uszkodzenie lokalne. Precyzyjna lokalizacja uszkodzenia wymaga dodatkowych analiz (widmo obwiedni) i będzie tematem innego opracowania.

LITERATURA

- [1] BARTELMUS W., *Diagnostyka maszyn górniczych – Górnictwo odkrywkowe*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1998.
- [2] ZIMROZ R., *Metoda diagnozowania wielostopniowej przekładni zębatych w napędach przenośników taśmowych z zastosowaniem modelowania*, Archiwum Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, praca niepublikowana, Wrocław 2002.
- [3] BARTELMUS W., ZIMROZ R., ZAJDA P., *Detekcja lokalnych uszkodzeń w łożyskach bębnow napędowych przenośników taśmowych*, Transport Przemysłowy 1(23), 2005.
- [4] BARTELMUS W., ZIMROZ R., HRYNISZYN S., *Diagnostyka uszkodzeń lokalnych na podstawie sygnału drgań w maszynach górniczych*, Górnictwo Odkrywkowe 4–5, 2005.
- [5] BARTELMUS W., ZIMROZ R., HRYNISZYN S., *Identyfikacja warunków eksploatacyjnych na potrzeby diagnostyki przekładni planetarnej do napędu koła czerpakowego*, XXXIII Ogólnopolskie Sympozjum „Diagnostyka Maszyn”, materiały w wersji elektronicznej, Węgierska Górka 2006.
- [6] GADE S., HERLUFSEN H., KONSTANTIN-HANSEN H., WISMER N.J., *Order Tracking Analysis*, Technical Review 2/1995.
- [7] DYK Sz. *Diagnostyka przekładni zębatych i łożysk bębnow przenośników taśmowych w warunkach ZG Polkowice-Sieroszowice*, Archiwum Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, praca niepublikowana, Wrocław 2006.

DIAGNOSTICS OF DRIVING UNIT IN BELT CONVEYORS IN UNDERGROUND COPPER MINE

The paper deals with a proposal of procedure of diagnostic investigation as a preliminary stage of condition monitoring. It has been suggested that introduced by Bartelmus relations between some physical factors (design, operational and change of conditions) and properties of diagnostic signal should be used for diagnostics of driving unit used in conveyors in underground copper mine. Taking into account such relations it can be planned how to prepare passive experiment for diagnostics purposes that means proper preparation of signal acquisition system, its parameters like sampling frequency signal duration, spectral resolution etc, operational conditions (load value), sensor location etc.