

*Walter Bartelmus**, *Radosław Zimroz**, *Wojciech Sawicki**,
*Marek Maniak***, *Zbigniew Woźniak***, *Karol Furmaniak***

WYBRANE ZAGADNIENIA DIAGNOSTYKI WIELOSTOPNIOWEJ PRZEKŁADNI ZĘBATEJ ZE STOPNIEM PLANETARNYM W UKŁADZIE NAPĘDOWYM KOPARKI KOŁOWEJ

1. Wprowadzenie

Zagadnienia wykrywania i rozpoznawania uszkodzeń i zużycia elementów oraz monitorowania stanu technicznego maszyn cieszą się coraz większym zainteresowaniem w przemyśle górnictwym, zarówno w kopalniach odkrywkowych, jak i podziemnych. Środki i metody diagnostyki stosowane przez komórki diagnostyczne są jednak na różnym poziomie — od przenośnych rejestratorów i analizatorów po rozbudowane wielokanałowe systemy monitorowania. Wyniki diagnozowania uzyskiwane przy pomocy stosowanych metod i środków są w pewnych przypadkach obarczone błędem, a nawet niepoprawne. Składa się na to kilka przyczyn: złożona budowa układów napędowych (wielostopniowa przekładnia, stopień planetarny) i związane z tym skomplikowana postać (struktura częstotliwościowa) sygnału i wysoki poziom zakłóceń podczas analizy stanu konkretnych elementów przekładni, zmienne warunki eksploatacyjne (zmiennosc obciążenia zewnętrznego przekładni związana ze zmianą warunków urabiania, zmianą prędkości obrotowych) (w zakresie 950÷990 RPM) powodujące zmienne w czasie własności sygnału, duże przełożenia ($u = 170$) powodujące wolnoobrotowy charakter pracy końcowych stopni, uniwersalizm większości przyrządów pomiarowych bez możliwości adaptacji do konkretnego obiektu itd. W niniejszej pracy zaproponowano kompletny, dedykowany system diagnostyczny obejmujący koncepcję układu rejestrującego sygnały (drganiowe będące głównym nośnikiem informacji o stanie technicznym i sygnały pomocnicze umożliwiające poprawną ekstrakcję cech diagnostycznych), metody ich przetwarzania w celu pozyskania informacji o wartościach symptomów oraz procedury prawidłowego rozpoznawania z uwzględnieniem wszystkich czynników mających wpływ na proces diagnozowania.

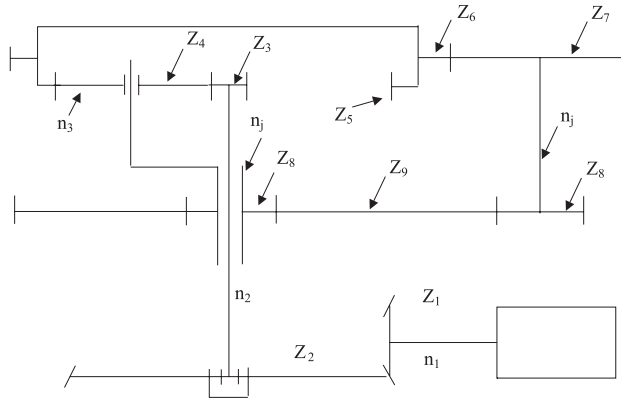
* Instytut Górnictwa, Politechnika Wroclawska, Wroclaw

** KWB „Konin” w Kleczewie SA

Podstawową cechą różniącą proponowane rozwiązanie od istniejących na rynku produktów jest monitorowanie i uwzględnianie zmienności warunków eksploatacyjnych, zastosowanie podejścia adaptacyjnego i możliwość „uczenia” systemu. Układ pracy jest następujący: w pierwszej części przedstawiony zostanie obiekt badań diagnostycznych, następnie zdefiniowane zostaną problemy i zadania wynikające ze specyfiki obiektu, skrótkowo opiszemy przebieg eksperymentu i wreszcie zaprezentujemy wyniki pomiarów i analiz. Na zakończenie przedstawiona zostanie aplikacja opracowana na potrzeby rozpoznawania stanu technicznego przekładni.

2. Opis obiektu

Obiektem badań jest wielostopniowa przekładnia zębata ze stopniem planetarnym KPA75/2 × A120 stosowana w układzie napędowym koła czepakowego w koparce kołowej SRs 1200. Schemat rozwiązania konstrukcyjnego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat rozwiązania konstrukcyjnego układu napędowego z przekładnią planetarnymi do napędu koła czepakowego w koparce SRs 1200

Na podstawie znajomości cech konstrukcyjnych (ilość zębów, wymiary łożysk, ilość elementów tocznych) i eksploatacyjnych (prędkość obrotowa) wyznaczono częstotliwości charakterystyczne (częstotliwości wałów, zazębnień i częstotliwości uszkodzeń łożysk).

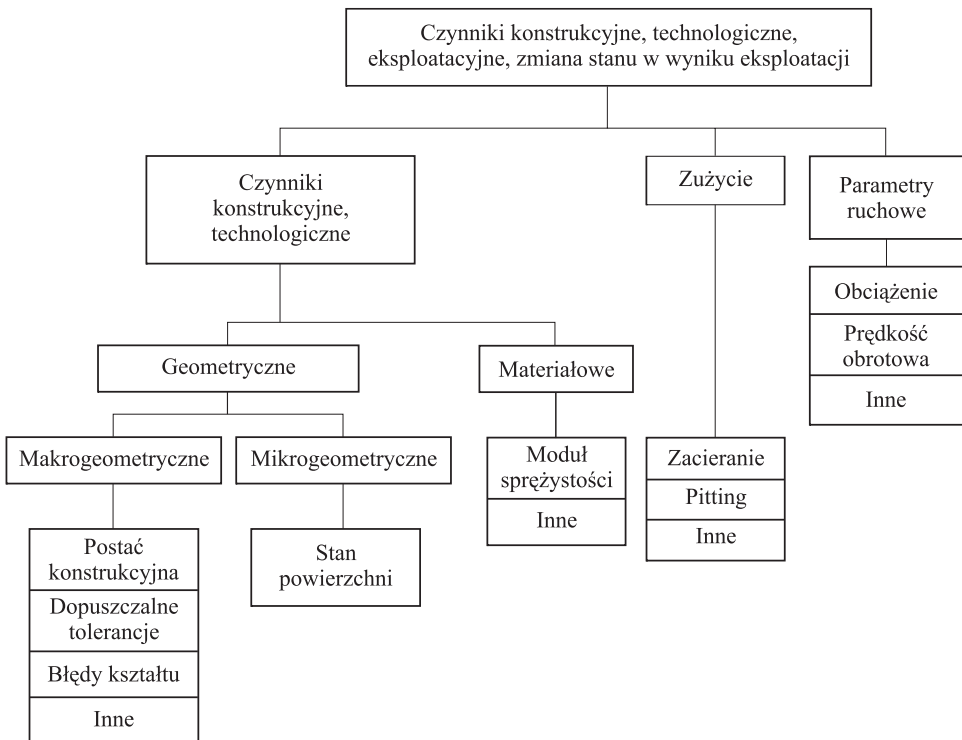
3. Definicja problemu

Dotychczasowe doświadczenia w zakresie eksploatacji i diagnozowania tego typu obiektów pozwalają sformułować następujące spostrzeżenia:

- zmienne warunki eksploatacyjne skutkują zmianami prędkości obrotowych i obciążenia zewnętrznego przekładni;

- zmienne warunki uniemożliwiają stosowanie bardzo efektywnego podejścia w ocenie stanu technicznego, jakim jest analiza widmowa;
- zastosowanie np. analizy rzędów jako źródła informacji diagnostycznej bez uwzględnienia informacji o obciążeniu jest niewystarczające;
- wartości cech diagnostycznych zależą od wartości obciążenia — bez uwzględnienia tej informacji diagnoza będzie nieprawidłowa (fałszywe alarmy lub brak wykrywania uszkodzeń);
- wybór zaawansowanych metod diagnozowania jest uzależniony od konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego, zakresu prędkości/obciążenia i zmienności, typu uszkodzenia.

Brak uwzględnienia ww. informacji skutkuje najczęściej niezadowolającymi wynikami diagnozy i powoduje utratę wiarygodności metod diagnostycznych. W celu pewnej systematyzacji należy rozpatrywać problem diagnozowania przekładni przez pryzmat wpływu czynników konstrukcyjnych, technologicznych, eksploatacyjnych i zmiany stanu (rys. 2). Czynniki te znacząco wpływają na postać sygnału generowanego przez przekładnię, co więcej wpływają na cały proces diagnozowania. Procedura diagnozowania w przypadku diagnozowania maszyn górniczych musi opierać się na tej koncepcji.



Rys. 2. Podział czynników wpływających na postać sygnału diagnostycznego [1]

4. Opis eksperymentu (systemy i urządzenia pomiarowe, punkty pomiarowe)

W ramach eksperymentu wykonano serię pomiarów obejmujących rejestrację prędkości obrotowej wału wejściowego, sygnałów drganiowych w czterech punktach pomiarowych na przekładni oraz dokonywano rejestracji wartości prądu pobieranego przez silnik. Pomiar drgań zostały wykonane za pomocą analizatora PULSE wyposażonego w przenośną kasetę pomiarową 3560C wraz z 6-kanalowym modulem 3032A i pięcioma akcelerometrami Endeeco.

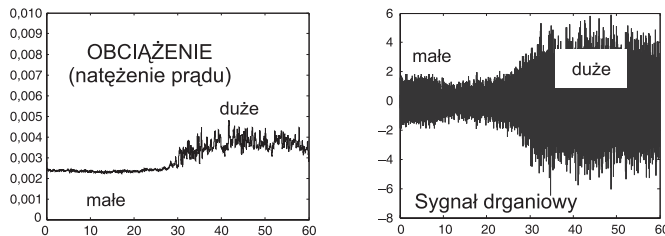
Pierwotnie rejestracji chwilowej prędkości obrotowej dokonano wykorzystując sondę tachometryczną. Pomiar prędkości realizowany jest poprzez przetwarzanie w systemie PULSE sygnałów optycznych wysyłanych przez sondę, a następnie odbitych od zamocowanej na wale wejściowym taśmy odbijającej sygnały optyczne i rejestrowanych przez sondę. Taśma odblaskowa została zamocowana na niezabudowanej części wału przed sprzęgłem hydrokinetycznym. Pomiar taki jest obciążony dużym błędem ze względu na poślizgi występujące na sprzęgle. Po konsultacjach z pracownikami KWB „Konin” wykorzystano sygnał tacho z systemu pomiarowego zainstalowanego na maszynie, służącego do rejestracji poślizgu na sprzęgle (rozumianego jako różnica prędkości przed i za sprzęgłem).

Pomiar obciążenia był realizowany pośrednio poprzez odczyt wartości prądu pobieranego przez układ napędowy przenośnika. Rejestracje poboru prądu odbywała się przy wykorzystaniu przekładnika prądowego i jednego z kanałów systemu PULSE.

5. Przykładowe wyniki pomiarów

5.1. Relacja pomiędzy wartością obciążenia a sygnałem drganiowym

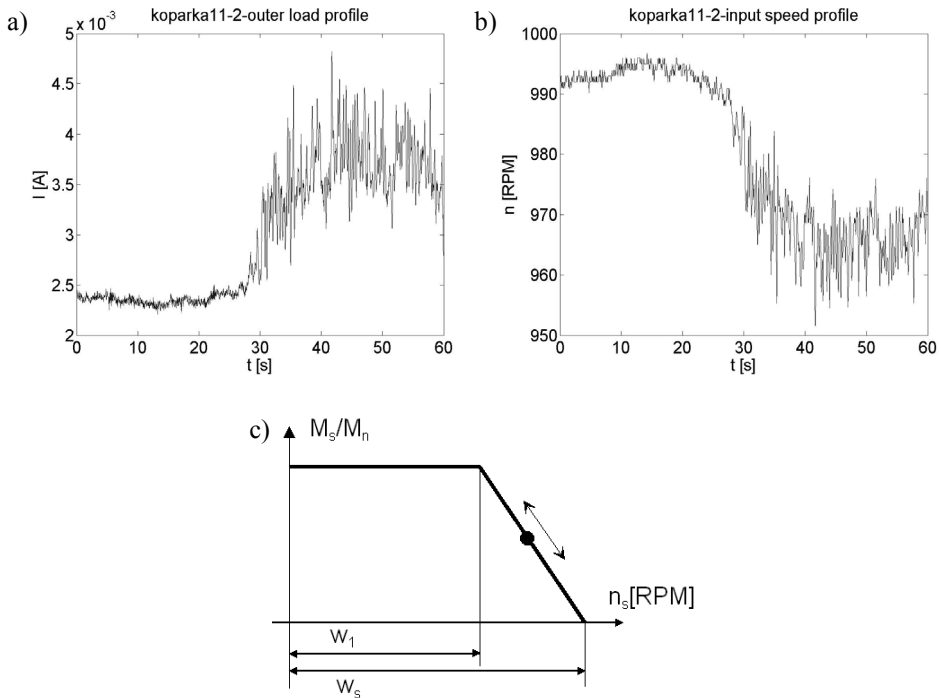
Jak już wspomniano kluczowym zagadnieniem jest uwzględnienie zależności pomiędzy chwilową wartością obciążenia a amplitudą sygnału drganiowego (wartością cechy diagnostycznej), jak pokazano na rysunku 3, zmiany obciążenia znacząco wpływają na postać sygnału. Szczegółowy opis dotyczący analizy zależności zmienne obciążenie – cechy diagnostyczne przedstawiono w pracy [2].



Rys. 3. Relacje pomiędzy wartością obciążenia realizowaną poprzez pomiar prądu pobieranego przez silnik a sygnałem drganiowym zarejestrowanym na korpusie przekładni

5.2. Relacja pomiędzy wartością obciążenia a prędkością obrotową

Jak wykazano we wcześniejszych pracach Bartelmusa pomiędzy wartością obciążenia a wartością prędkości obrotowej istnieje ścisła zależność (ujemna korelacja) wynikająca z charakterystyki silnika (rys. 4c). Na rysunku 4a i 4b pokazano przykładowe profile obciążenia i prędkości przedstawiające chwilowe wartości obciążenia/prędkości w funkcji czasu. Obydwa sygnały zostały zarejestrowane w tym samym czasie podczas normalnej eksploatacji.



Rys. 4. Relacje pomiędzy wartością obciążenia realizowaną poprzez pomiar prądu pobieranego przez silnik a prędkością obrotową wału wejściowego (a, b); charakterystyka silnika (c)

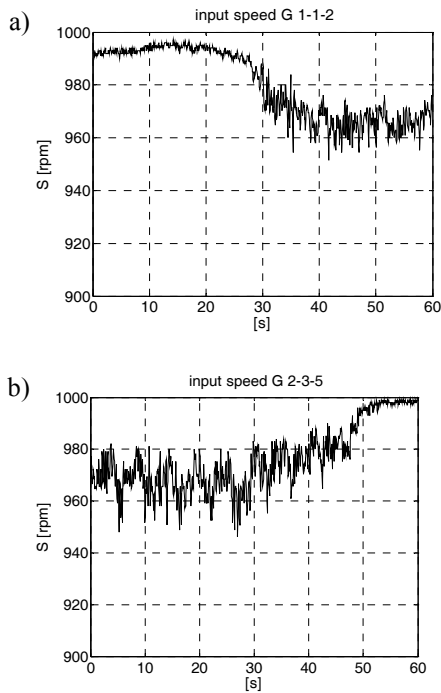
5.3. Analiza wpływu warunków eksploatacyjnych na wartości pozyskiwanych cech diagnostycznych

Przy tak dużej złożoności przekładni diagnozowanie na podstawie nieprzetworzonego sygnału drganiowego nie daje dobrych rezultatów, naturalnym krokiem jest odpowiednie przetworzenie sygnału w celu pozyskania użytecznej informacji diagnostycznej, tzw. cech diagnostycznych. Najczęściej stosowane w praktyce przemysłowej są cechy diagnostyczne wyznaczone na podstawie analizy widmowej i analizy obwiedni. Ze względu na zmiany prędkości obrotowej widmo sygnału drganiowego jest rozmyte i praktycznie uniemożliwia identyfikację składowych o częstotliwościach charakterystycznych i ich amplitud. Interesu-

jącym rozwiązaniem jest zastosowanie tzw. analizy rzędów, przedstawiającej dystrybucję amplitud nie w funkcji częstotliwości lecz obrotów wałów, co skutecznie eliminuje efekt rozmywania składowych [3, 4]. Zastosowanie analizy rzędów nie rozwiązuje problemu całkowicie. Nadal istotna jest identyfikacja obciążenia i jego wpływu na amplitudy składowych widma.

Analogiczny problem wpływu obciążenia na wartość cechy diagnostycznej występuje przy analizie obwiedni. W tej części pracy zaprezentowane zostaną wyniki analizy widmowej (widma rzędów) i widma obwiedni dla przekładni w dobrym stanie technicznym i przekładni przewidzianej do remontu okresowego w kontekście wpływu obciążenia.

Na rysunku 5 pokazano przykładowe profile prędkości pozwalające stwierdzić dużą zmienność warunków eksploatacyjnych (WE).



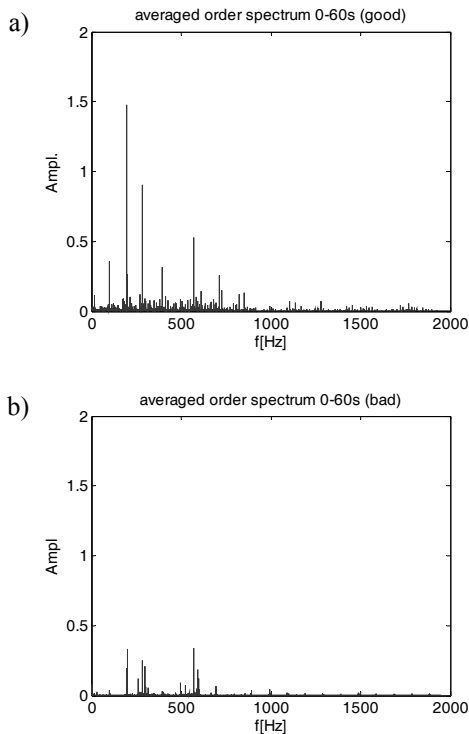
Rys. 5. Przykładowe profile prędkości dla przekładni w dobrym stanie technicznym (a) i przekładni przed planowanym remontem (b)

Na podstawie rysunku 5a można ocenić WE dla sygnału G112 (przedział czasowy 0–30 wartość prędkości jest powyżej 990 RPM, co oznacza brak lub niewielkie obciążenie, następnie obserwujemy znaczny spadek prędkości, który wiąże się z rozpoczęciem procesu urabiania). Dla sygnału G235 (rys. 5b) przekładnia pracuje pod obciążeniem w przedziale $t = 0 \div 30$, następnie obciążenie spada w przedziale $t = 30 \div 50$, a podczas ostatnich 10 s — $t = 50 \div 60$ — obserwujemy brak obciążenia. Przedstawione przykłady — opisują typowe warunki eksploatacyjne występujące podczas urabiania.

5.4. Uśrednianie

Jak już wspomniano, zastosowanie analizy rzędów nie rozwiązuje problemu poprawnego pozyskiwania informacji o stanie przekładni. Wciąż istotna jest identyfikacja obciążenia i jego wpływu na amplitudy składowych widma. W tej części pracy wykazemy, że ignorowanie informacji o obciążeniu dla tak zmiennych warunków obciążenia generuje błędne decyzje diagnostyczne.

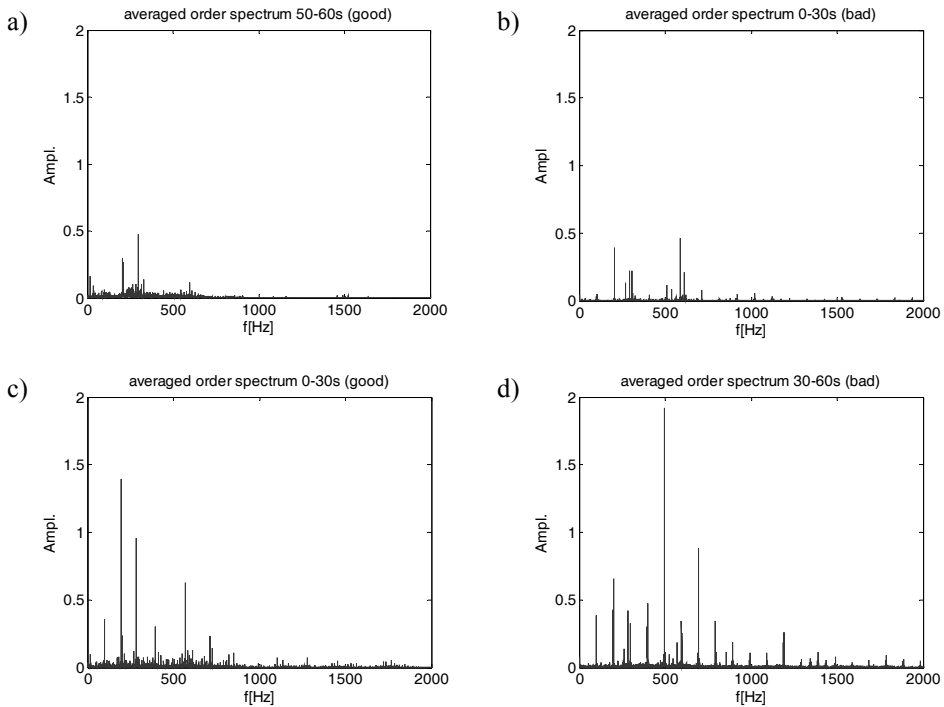
Na rysunku 6 pokazano uśrednione (dla sygnału 60 s) widma rzędów dla przekładni w różnym stanie technicznym (prawidłowym i przed planowanym remontem). Z porównania amplitud wynika zupełnie odmienna ocena stanu technicznego — przekładnia w dobrym stanie generuje drgania o większych poziomach niż przekładnia przeznaczona do remontu, co pozwala wysnuć wniosek, że uśrednianie widma rzędów bez uwzględnienia obciążenia jest błędne.



Rys. 6. Uśrednione widma rzędów dla przekładni w dobrym stanie technicznym (a) i przekładni przed planowanym remontem (b)

Identyfikacja obciążeń i analiza widmowa (z wykorzystaniem widma rzędów) dla porównywalnych warunków obciążenia jest absolutnie koniecznym warunkiem osiągnięcia poprawnej diagnozy. Okazuje się jednak, że porównywalne warunki obciążenia nie są jedy-

nym warunkiem osiągnięcia poprawnej diagnozy. Diagnozowanie w podobnych warunkach obciążenia niewielkiej wartości jest — jak pokazano na rysunkach 7a i 7b — nieskuteczne.



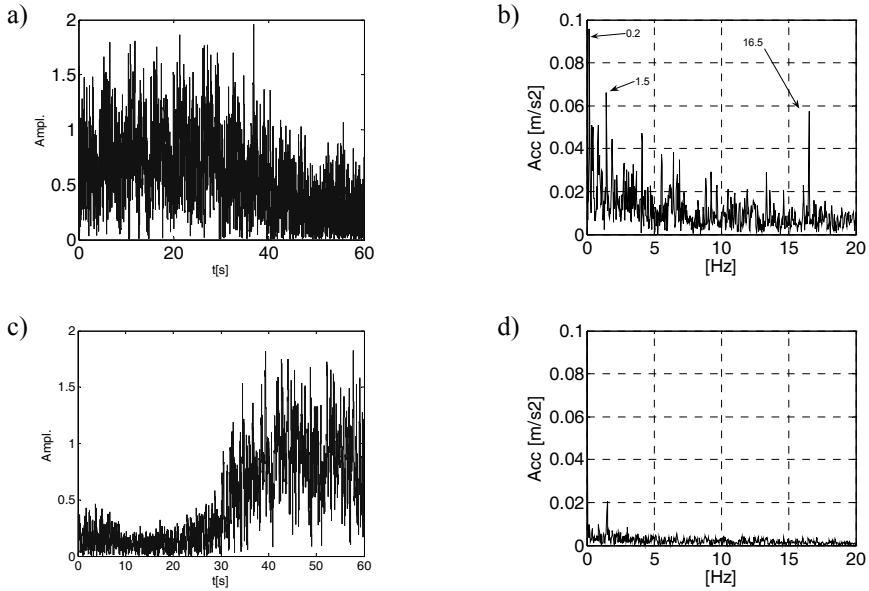
Rys. 7. Porównanie widma rzędów dla dobrego i złego stanu technicznego odpowiednio dla małych obciążeń i dla dużych obciążeń

Wykonanie analiz dla obciążonej przekładni pozwala uzyskać wyraźne różnice w poziomach widma rzędów i umożliwia postawienie poprawnej diagnozy (rys. 7c i 7d).

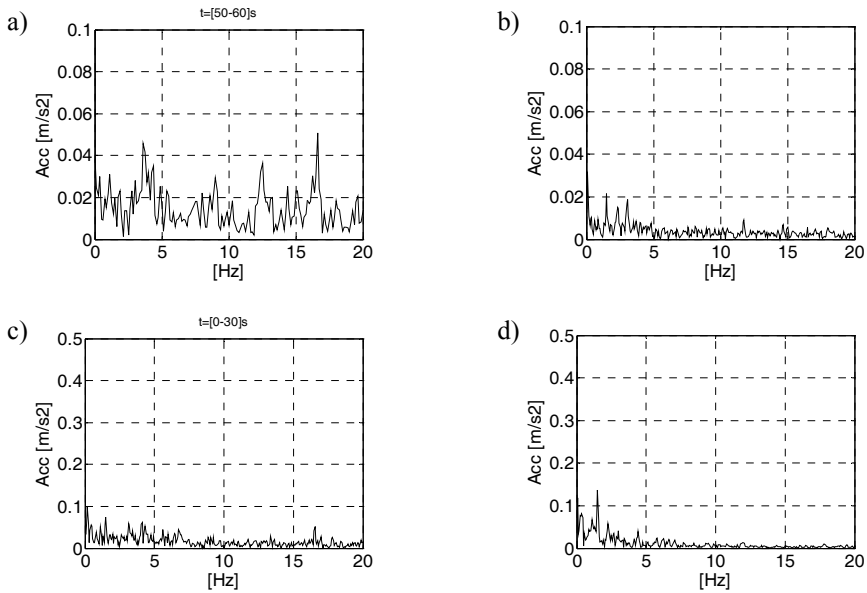
5.5. Pozyskiwanie cech diagnostycznych z wykorzystaniem analizy obwiedni

Podobne rozumowanie jak dla widma rzędów przeprowadzono dla analiz: obwiedni i widma obwiedni. Demodulacji dokonano wokół pierwszej harmonicznej częstotliwości ząbienia stopnia planetarnego, dla szerokości filtru pasmowo-przepustowego ± 20 Hz. Przebiegi obwiedni i jej uśrednione widmo bez uwzględnienia obciążenia dla przekładni w prawidłowym i nieprawidłowym stanie pokazano na rysunku 8.

Analiza struktury widma (rys. 9) dla wydzielonych sygnałów dla niewielkiego i dużego obciążenia dla przekładni w prawidłowym i nieprawidłowym stanie technicznym pokazuje jak ważna jest informacja o obciążeniu oraz prawidłowa interpretacja rozumiana jako analiza wpływu czynników na postać sygnału.



Rys. 8. Obwódka i uśrednione widmo obwódki dla 60 s dla przekładni w prawidłowym i nieprawidłowym stanie technicznym



Rys. 9. Widma obwódki dla przekładni w prawidłowym (good — G) i nieprawidłowym (bad — B) stanie technicznym dla: a)–b) niewielkiego obciążenia (G, B); c)–d) duże obciążenia (G, B)

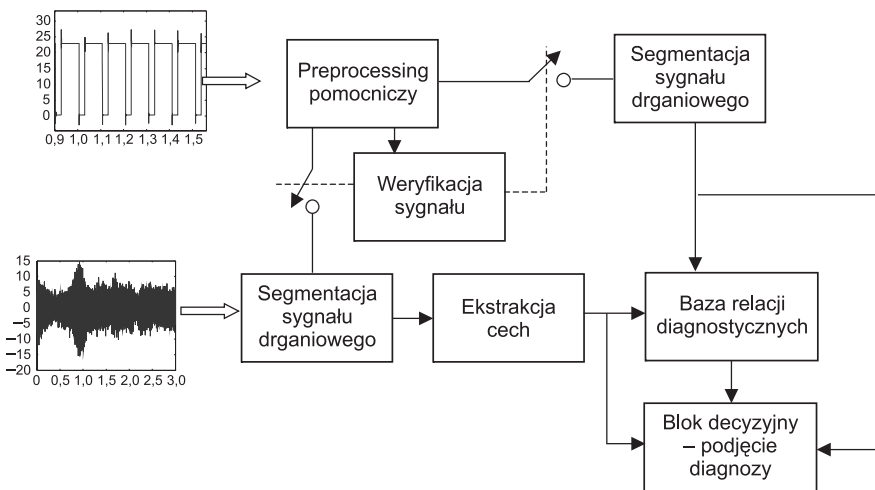
Na podstawie pokazanych wyników można wysnuć kilka fundamentalnych (z punktu widzenia możliwości uzyskania poprawnej diagnozy) wniosków, a mianowicie: zmienne obciążenie ma wpływ na czytelność widma, wartość obciążenia ma wpływ na wartość amplitudy prążków w widmie sygnału i widmie obwiedni, diagnozowanie przy małych obciążeniach daje zupełnie przeciwne wyniki diagnozy, uśrednianie przy jednoczesnym zaniedbaniu wartości obciążenia powoduje błędne diagnozy.

5.6. Automatyczna, obiektywna ocena stanu technicznego

Mając na uwadze konkluzje przedstawione powyżej, zaproponowano system diagnostyczny, którego schemat pokazano na rysunku 10.

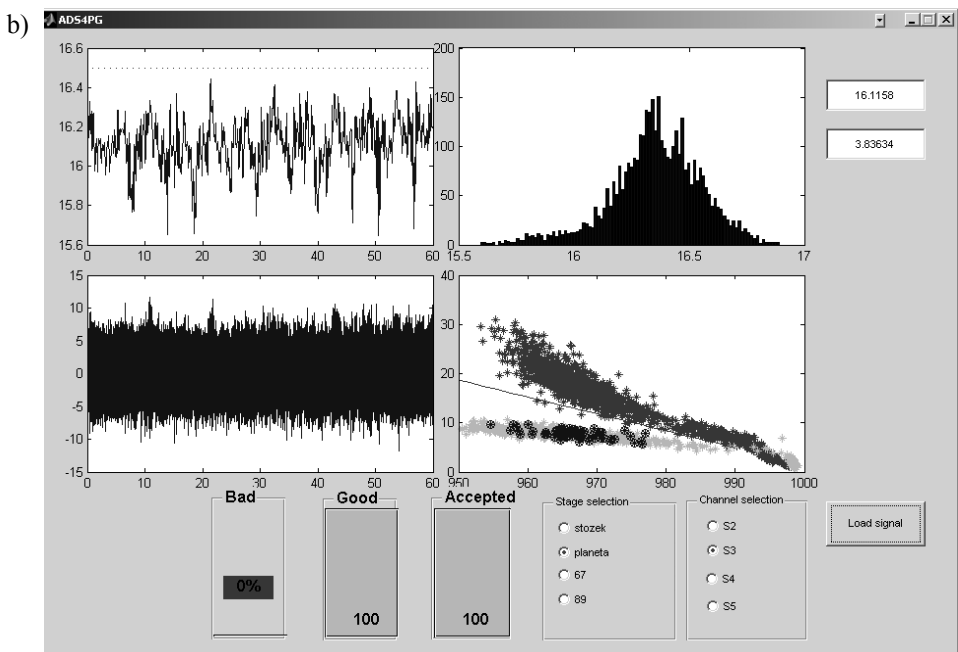
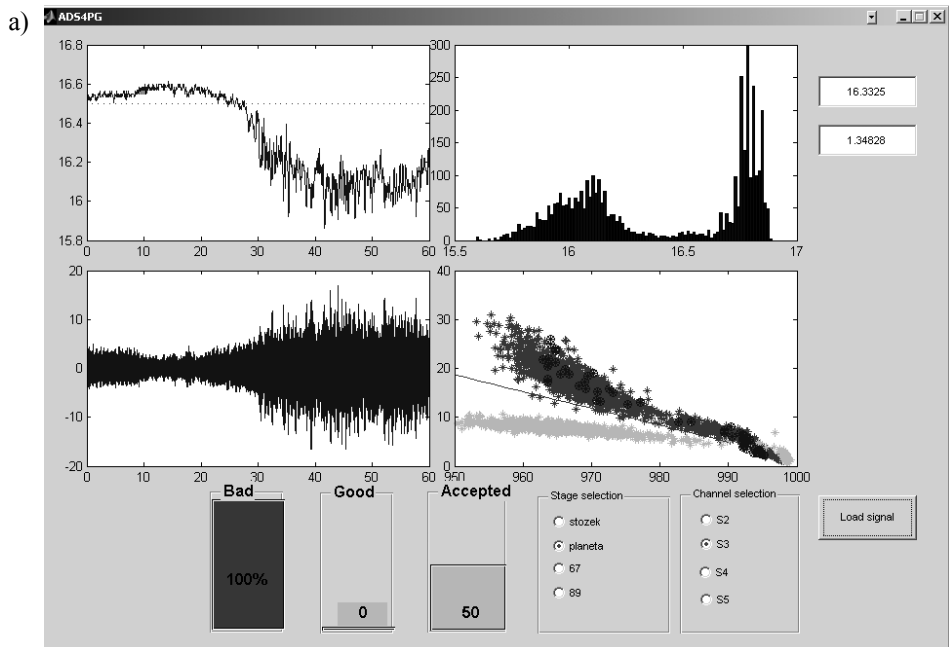
System jest „inteligentny” — rozpoznaje warunki eksploatacyjne, dla których zrealizowano pomiar, wybiera sygnały zarejestrowane przy odpowiednim obciążeniu, dokonuje ich segmentacji i dalszego przetwarzania.

Wnioskowanie na podstawie cech diagnostycznych odbywa się w sposób adaptacyjny — z uwzględnieniem wartości obciążenia [5].



Rys. 10. Schemat blokowy samoczącego się systemu diagnostycznego

Na rysunku 11 pokazano interface użytkownika aplikacji realizującej proces przetwarzania informacji diagnostycznej i wnioskowania realizujące zaprezentowane podejście. W zależności od warunków eksploatacyjnych procent wykorzystania sygnału jest różny (rys. 11a — 50% segmentów zostało wykorzystanych, rys. 11b — 100%). Ze względu, dużą niestacjonarność sygnału może się okazać, że pewna część cząstkowych diagnoz jest nieprawidłowa. Nie wpływa to jednak na końcową diagnozę.



Rys. 11. Okno aplikacji i przykładowe wyniki rozpoznawania:
 a) nieprawidłowy stan techniczny; b) prawidłowy stan techniczny

6. Wnioski

W pracy zaprezentowano „inteligentny”, adaptacyjny system diagnostyczny dedykowany wielostopniowej przekładni ze stopniem planetarnym, pracującej w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Ocena stanu dokonywana jest na podstawie odpowiednio przetworzonych sygnałów drganiowych. Ze względu na zmienne warunki eksploatacyjne jako kryterium adaptacji do wnioskowania przyjęto średnią prędkość w cyklu czerpaka. Monitorowanie średniej prędkości w cyklu pozwala także odrzucać pewne fragmenty sygnału, dla których uzyskanie poprawnej diagnozy jest niemożliwe.

LITERATURA

- [1] *Bartelmus W.*: Diagnostyka Maszyn Górniczych. Górnictwo Odkrywkowe, Katowice 2000
- [2] *Bartelmus W., Zimroz R., Sawicki W.*: Wpływ zmiennych warunków eksploatacji na proces oceny stanu przekładni planetarnych w układach napędowych koła czerpakowego koparek kołowych, Materiały Konferencyjne WIBROTECH, Kraków 2006
- [3] *Gade S., Herlufsen H., Konstantin-Hansen H., Wismer J.*: Order Tracking Analysis, B&K Technical Review, No. 1, 1999
- [4] *Bartelmus W., Sawicki W., Zimroz R.*: Analiza rzędów i filtracja Volda-Kalmana w diagnostyce przekładni planetarnych w warunkach zmiennego obciążenia. Ogólnopolska Konferencja „Diagnostyka Maszyn”, Materiały Konferencyjne, Węgierska Górką, 2007
- [5] *Bartelmus W., Zimroz R.*: Adaptacyjna metoda wnioskowania o stanie przekładni pracującej w zmiennych warunkach obciążenia. Ogólnopolska Konferencja „Diagnostyka Maszyn”, Materiały Konferencyjne, Węgierska Górką, 2007