

*przekładnia zębata, diagnostyka, zmienne obciążenia,
badania eksperymentalne, symulacja komputerowa*

Walter BARTELMUS*, Radosław ZIMROZ*

DIAGNOZOWANIE STANU TECHNICZNEGO PRZEKŁADNI ZĘBATYCH PRACUJĄCYCH W ZMIENNYCH WARUNKACH OBCIĄŻENIA Z WYKORZYSTANIEM BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH I SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

Wpłynęło 7 maja 2010 r., zaakceptowano 20 maja 2010 r.

Wielu badaczy w kraju i za granicą zajmowało się rozwiązaniem problemu diagnozowania stanu maszyn przy zmiennych obciążeniach, lecz żaden z nich nie uzyskał zadowalających wyników. Były to wyłącznie badania laboratoryjne przy uproszczonych formach zmian obciążenia. Autorzy przedstawili rozwiązanie tego problemu i zweryfikowali je na obiektach rzeczywistych, charakteryzujących się bardzo skomplikowaną budową i szybkozmiennymi zmianami obciążenia możliwymi do sprowadzenia ich do zmian około jednosekundowych. W prowadzonych przez autorów pracach naukowo badawczych stwierdzono, że nie ma jednopunktowego reprezentanta sygnału odniesienia, może być tylko funkcja odniesienia. Nazwano ją charakterystyką podatności na zmiany obciążenia. Przy budowie tych charakterystyk należy uwzględniać zmienność obciążenia i zmienność prędkości obrotowych poprzez dobór odpowiednich krótko czasowych estymat sygnałów. Aby wyznaczyć charakterystykę odniesienia, należy poddać wartości tych estymat analizie regresji. W wyniku tej analizy, otrzymano liniową charakterystykę obiektu, której istotnym są parametry regresji czyli wartość przecięcia osi rzędnych i współczynnik kierunkowy linii prostej. W miarę zmiany stanu początkowo może zmieniać się współczynnik kierunkowy linii regresji. Jest ona spowodowana zmianami stanu łożysk tocznych takich jak nierównomierne zużycie ścierne łożysk podtrzymujących wały lub uszkodzenia bieżni. W obu przypadkach następuje praca wałów w warunkach ukosowania. Praca wałów z ukosowaniem powoduje, że przy zmiennym obciążeniu sygnał diagnostyczny jest funkcją jego stanu technicznego i funkcją obciążenia.

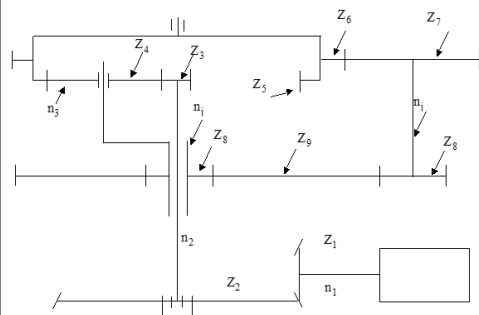
* Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii, Instytut Górnictwa, pl. Teatralny 2, 50-051 Wrocław.

1. WPROWADZENIE

Autorzy wykazali, że przez odpowiednią analizę sygnału wibroakustycznego, można określić stan techniczny złożonych układów napędowych maszyn stosowanych w bardzo trudnych warunkach eksploatacyjnych, charakteryzujących się zmiennością obciążenia. Powstał opis i wiarygodna eksperymentalna obserwacja zjawiska zmieniającej się podatności maszyny ze zmianą jej stanu technicznego. Opis zjawiska stanowią charakterystyki stanu maszyny określone przez autorów i dają one podstawę do stworzenia nowej metody diagnostycznej. Wielu badaczy w kraju i za granicą zajmowało się rozwiązaniem problemu diagnozowania stanu maszyn przy zmiennych obciążeniach, lecz żaden z nich nie uzyskał zadowalających wyników. Były to wyłącznie badania laboratoryjne przy uproszczonych formach zmian obciążenia. Autorzy przedstawili rozwiązanie tego problemu i zweryfikowali je na obiektach rzeczywistych, charakteryzujących się bardzo skomplikowaną budową i szybkozmiennymi zmianami obciążenia możliwymi do sprowadzenia ich do zmian około jednosekundowych.

Opracowana metoda powstała w wyniku badań:

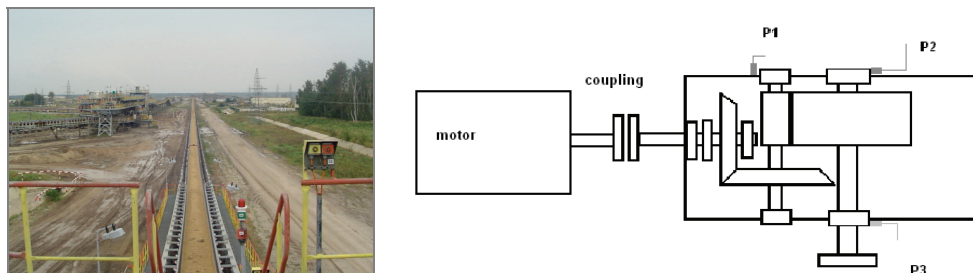
- na obiektach rzeczywistych jak koparki kołowe (napęd koła czerpakowego, rys. 1) (gigantyczne koparki stosowane w kopalniach odkrywkowych), przenośniki taśmowe (napęd taśmy, rys. 2),
- wykorzystujących modelowanie matematyczne i symulacje komputerowe: model dwustopniowej przekładni zębatej (rys. 3), model przekładni planetarnej (rys. 4).



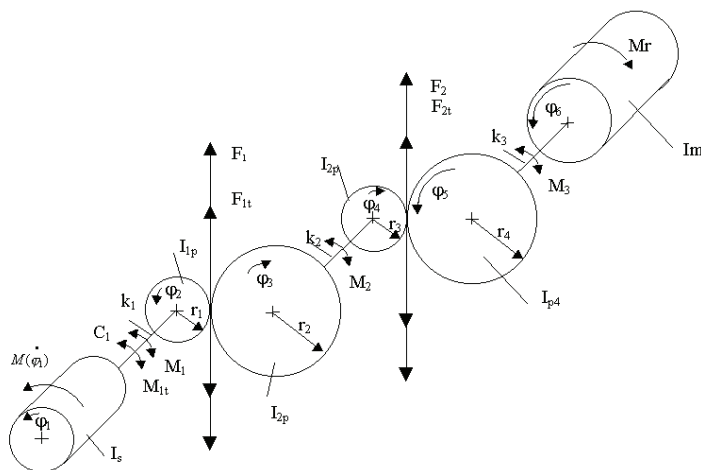
Rys. 1. Widok napędu koła czerpakowego ze schematem przekładni zębatej

Punktem wyjścia do badań na obiektach rzeczywistych była praca [1]. W pracy tej poruszono problem zmian obciążenia i jego wpływu na sygnał wibroakustyczny. Dotyczyło to tylko zagadnienia oceny stanu przekładni napędu przenośnika pracującego przy dwóch różnych poziomach obciążenia. Przyjęto tutaj związek liniowy między

stanem obciążenia a parametrem sygnału wibroakustycznego i można było to potraktować jako hipotezę. Sprawdzenie jej zwłaszcza dla takich obiektów jak układy napędowe kół czerpakowych koparek kołowych nie było możliwe w tym czasie, ze względu na ograniczenia w możliwości rejestracji, przetwarzania dużej liczby danych pomiarowych, sprzętowe i finansowe.



Rys. 2. Widok przenośnika ze stacji napędowej wraz ze schematem układu napędowego



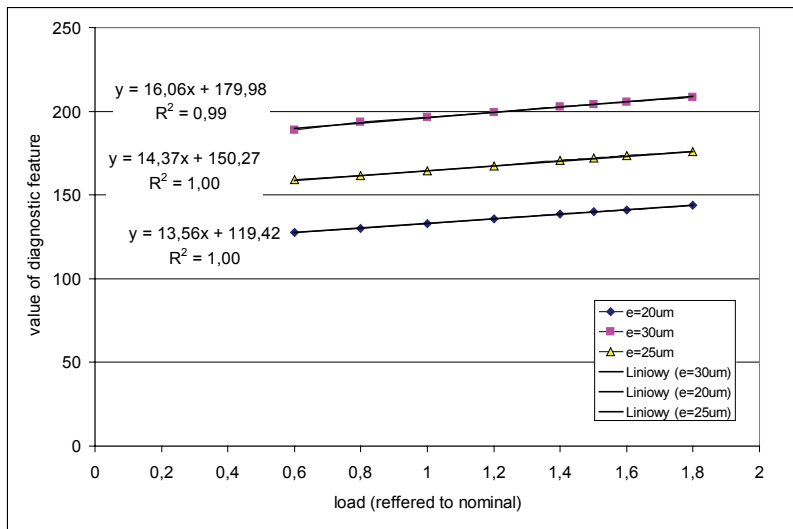
Rys. 3. Model przekładni dwustopniowej

Wykorzystując nowe możliwości badań na obiektach rzeczywistych układów napędowych koparek kołowych i napędów przenośników taśmowych wykryto związek między własnościami sygnału (drżania mechaniczne) a stanem obciążenia układów. W takim przypadku własności sygnałów zmieniają się zarówno w dziedzinie amplitudy, jak i częstotliwości. W dotychczasowej praktyce, własności powstających zmian częstotliwości są eliminowane poprzez wykorzystanie analizy rzędów. Zagadnienie wpływu zmiennego obciążenia próbowano rozwiązać poprzez normalizację sygnałów w stosunku do sygnału odpowiadającego stanowi początkowemu obiektu. W prowadzonych przez autorów pracach naukowo badawczych stwier-

2. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH I SYMULACJI KOMPUTEROWYCH

Aby wyznaczyć charakterystykę odniesienia (rys. 5) należy poddać wartości tych estymat analizie regresji. W wyniku tej analizy, otrzymano liniową charakterystykę obiektu, której istotnym są parametry regresji, czyli wartość przecięcia osi rzędnych i współczynnik kierunkowy linii prostej. W miarę zmiany stanu początkowo może zmieniać się współczynnik kierunkowy linii regresji. Jest ona spowodowana zmianami stanu łożysk tocznych takich jak nierównomierne zużycie ściernie łożysk podtrzymujących wały lub uszkodzenia bieżni. W obu przypadkach następuje praca wałów w warunkach ukosowania. Praca wałów z ukosowaniem powoduje, że przy zmiennym obciążeniu sygnał diagnostyczny jest funkcją jego stanu technicznego i funkcją obciążenia. Początkowe zmiany stanu obiektu, można obserwować poprzez zmianę współczynnika kierunkowego linii regresji.

Niekorzystna praca elementów w warunkach ich ukosowania powoduje powstanie innych form zmiany stanu technicznego, jak np. powstanie uszkodzeń na powierzchniach zazębienia przekładni zębatych. W takim przypadku, zauważono pojawienie się innych zmian w charakterystyce stanu. Charakterystyka ta jako funkcja obciążenia, zaczyna przyjmować formę nieliniową.

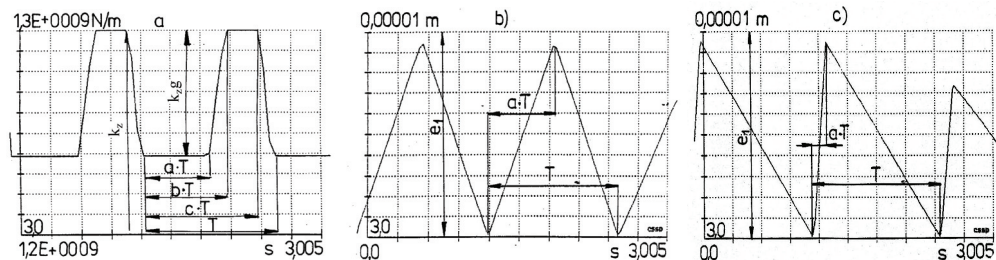


Rys. 7. Charakterystyki podatności dla przekładni walcowej przy zmieniającej się wielkości błędów e (rys. 8b)

Opisane zjawiska zostały zaobserwowane na podstawie badań układów napędowych koparek kołowych pracujących w kopalniach odkrywkowych przy zmieniają-

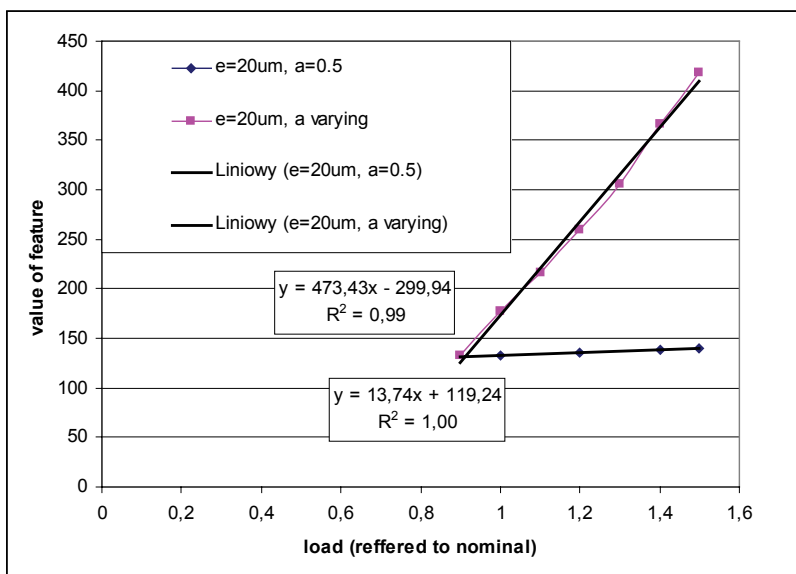
cych się obciążeniach zewnętrznych wynikających z własności technologii urabiania i urabianego górotworu, przedstawiono je w publikacji [2].

Dla potwierdzenia badań eksperymentalnych i poszerzenia możliwości stawiania diagnoz stanu i jego prognozowania przeprowadzono symulacje komputerowe. W tym celu wykorzystano podstawową publikację w tym zakresie [3–6] odnośnie modelu przedstawionego na rysunku 2 oraz publikacje [7–8] odnośnie modelu przedstawionego na rysunku 3.



Rys. 8. Charakterystyka zmian: a) sztywności ząbienia b) funkcja błędu ząbienia $E(0,5, 10, 0,3)$ c) funkcja błędu ząbienia $E(0,1, 10, 0,3)$

Pokazano, że dla obiektu charakteryzującego się początkowym stanem technicznym związek między obciążeniem a parametrem stanu obiektu jest liniowy.



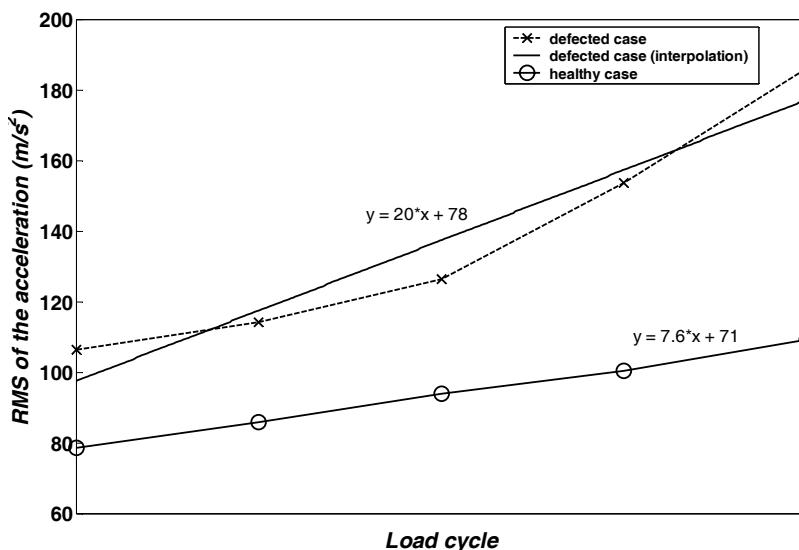
Rys. 9. Charakterystyka zmiany podatności, funkcja błędu e (rys. 8c) przy jednoczesnej względnej zmianie wartości obciążenia od 0,85 do 1,6

Pokazano również, że gdy zmienia się ukosowanie wałów w przekładniach zębatych, zmienia się charakterystyka stanu przekładni i uzyskana relacja między parametrem stanu obiektu a obciążeniem jest liniowa a współczynnik kierunkowy prostej wzrasta w stosunku do charakterystyki, gdy ukosowanie nie występuje (rys. 9 i 10). Uzyskany wynik jest zgodny z badaniami na obiektach rzeczywistych.

Występowanie innych form uszkodzenia zazębienia powoduje błędy współpracy zębów. W wyniku tego, następuje równoległe przesunięcie charakterystyki stanu powodując zwiększenie parametru na osi rzędnej charakterystyki liniowej (rys. 7) dla przekładni walcowej pokazanej na rysunku 2. Więcej na ten temat przedstawiono w publikacji [9].

Charakterystyki błędów przedstawiono na rysunku 8.

Badania symulacyjne wykonano zgodnie z przedstawionymi publikacjami [4–6] autorów dotyczącymi symulacji komputerowych przekładni walcowych a przy współpracy z pracownikami z uniwersytetu w Sfax w Tunezji dla przekładni planetarnej [7, 8]. Całość zagadnień przedstawiono w publikacji [10] pod redakcją W. Bartelmusa.



Rys. 10. Charakterystyka zmiany podatności, funkcja błędu e (rys. 8c) przy jednoczesnej względnej zmianie cyklu obciążenia dla modelu przekładni planetarnej (rys. 4)

3. PODSUMOWANIE

Badania na obiektach rzeczywistych pokazują, że w warunkach zmienności obciążenia niezbędnym jest przedstawienie parametrów diagnostycznych estymowanych

z sygnału wibroakustycznego w funkcji obciążenia lub prędkości obrotowej pod warunkiem, że znana jest relacja między prędkością a obciążeniem. Dla silników elektrycznych asynchronicznych relacja ta jest liniowa podczas normalnej eksploatacji w warunkach zmiennego obciążenia.

Wykazano, że stan poszczególnych par dla obiektów nowych: zazębienie łożyska toczne można przedstawić jako funkcję liniową obciążenia o małej wrażliwości na zmiany obciążenia. W wyniku zmiany stanu zwiększa się wrażliwość obiektu na zmiany obciążenia, co wpływa na współczynnik kierunkowy prostej w relacji parametr stanu obiektu jako funkcja obciążenia. Powstała nowa miara oceny stanu maszyny, którą należy wyznaczyć niezależnie od wybranego estymatora oceny. Miarę tę należy wyznaczać dla wszystkich obiektów niezależnie czy pracują przy stałych czy zmieniających się obciążeniach. Wrażliwość na zmiany obciążenia dla obiektów nowych jest miarą jakości obiektu. Pożądana jest mała wrażliwość obiektu na zmiany obciążenia.

ACKNOWLEDGMENT

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2010–2013 jako projekt badawczy.

LITERATURA

- [1] BARTELMUS W., *Vibration condition monitoring of gearboxes*, Machine Vibration, 1992, nr 1, s. 178–189.
- [2] BARTELMUS W., ZIMROZ R., *A new feature for monitoring the condition of gearboxes in non-stationary operation conditions*, Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, nr 23, s. 1528–1534.
- [3] BARTELMUS W., *Mathematical Modelling and Computer Simulations as an Aid to Gearbox Diagnostics*, Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, Vol. 15, nr 5, s. 855–871.
- [4] BARTELMUS W., *Mathematical Modelling of Gearbox Vibration for Fault Diagnosis*, International Journal of COMADEM, 2000, Vol. 3, No. 4, pp. 5–15.
- [5] BARTELMUS W., *Computer-aided multistage gearbox diagnostic inference by computer simulation*, Scientific Papers of the Institute of Mining of Wrocław University of Technology, 2002, No. 100, pp. 3–115.
- [6] BARTELMUS W., *Condition monitoring of open cast mining machinery*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
- [7] CHAARI F., HBAIEB R., FAKHFAKH T., HADDAR M., *Dynamic response simulation of planetary gears by the iterative spectral method*, Int. J. Simul. Model., 2005, 4(1), s. 35–45.
- [8] CHAARI F., FAKHFAKH T., HBAIEB R., LOUATI J., HADDAR M., *Influence of manufacturing errors on the dynamic behaviour of planetary gears*, Int. J. Adv. Manuf. Tech., 2006, 27, pp. 738–746.
- [9] BARTELMUS W., CHAARI R., ZIMROZ R., HADDAR M., *Modelling of gearbox dynamics under time varying non-stationary operation for distributed fault detection and diagnosis*, European Journal of Mechanics (w druku).
- [10] BARTELMUS W., *Vibration diagnostic method for planetary gearboxes under varying external load with regard to cyclostationary analysis*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Wrocław 2009.

DIAGNOSIS OF GEARBOXES UNDER TIME VARYING LOAD USING MODELING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS

Many researchers in Poland and abroad were investigating the problem of machinery diagnosing, which work under condition of varying external load, but none has solved the problem. The researchers were concentrated on laboratory investigations and under condition of simplified form of load varying. The authors showed the solution of the problem and verified it on real objects, which characterized with the complex design and fast varying external load with possibility to reduce to one second variations.

In the author's results of investigations it is stated that there is not one point which is the signal represent but it is a reference function. It is called yielding characteristic, which shows the influence load variation on the characteristic. When preparing the characteristic one has to take into consideration the external load variation or the velocity variation and coming from this using short time signal estimators. To obtain the characteristic one ought to make the regression analysis for signal estimators. From the analysis the linear regression has obtained, for which parameters of the regression as the value of a slope and a vertical coordinate intercept are obtained. At beginning as a machine condition is worsen the slope of regression line increasing. It is caused by bearing condition change by friction wear or a bearing race fault. In both cases it causes shafts run under misalignment. Under the varying external load condition the parameters of the vibration signal is the function of the external load and function of machine condition change.

