

MIARY ZMĘCZENIOWEGO USZKODZENIA KÓŁ ZĘBATYCH

Jędrzej MAĆZAK, Maciej ZAWISZA

Instytut Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej
02-524 Warszawa, ul. Narbutta 84, (0-22) 660-72-86, jma@simr.pw.edu.pl, mzawisza@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych przekładni zębatej podczas prób trwałościowych na stanowisku mocy krążącej. W ich wyniku stwierdzono, że wraz z pojawieniem się a następnie rozwijaniem uszkodzenia zmęczeniowego stopy zęba wzrasta wpływ czynników losowych w sygnale wibroakustycznym. Do oceny tego zjawiska wykorzystano miarę informacji wzajemnej Kullback'a jako miarę zmiany rozkładów prawdopodobieństwa oraz obwiedniowego wskaźnika przyporu (ECF), obliczanych dla różnych postaci analitycznych sygnału SWA.

Słowa kluczowe: diagnostyka wibroakustyczna, modele diagnostyczne, zmęczeniowe pęknięcia zęba.

MEASURES IN THE FATIGUE TOOTH DAMAGE

Summary

In the paper the results of gear laboratory fatigue tests were presented leading to the conclusion that the impact of stochastic factors increases with fatigue damage evolution. To quantify this effects authors use the Kullback's information and envelope contact factor (ECF) as the measure of the probability distribution changing. On this way it was possibly to make the diagnostic model of fatigue tooth damage.

Keywords: vibroacoustic diagnostics, diagnostic models, fatigue tooth failure.

1. WSTĘP

Zagadnienie prognozowania trwałości zmęczeniowej krytycznych elementów maszyn i urządzeń jest przedmiotem zainteresowań wielu badaczy. Szczególne miejsce spośród wielu zagadnień związanych z tym tematem, zajmuje problematyka diagnozowania okresu prenukleacyjnego oraz wykrywania inicjacji pęknięcia zmęczeniowego.

Większość dotychczasowych badań zmęczeniowego pęknięcia zęba u podstawy polega na śledzeniu wielkości pęknięcia zęba. Taki sposób prowadzenia eksperymentu niesie ze sobą możliwość popełnienia dużego błędu. Poprzez wprowadzenie sztucznego wstępnego zainicjowania pęknięcia na jednym z zębów można zakłócić przebieg niskoenergetycznej początkowej fazy inicjacyjnej pęknięcia.

By zwiększyć wiarygodność prognozy o stanie badanej przekładni postanowiono poszukać innych miar określających jej stan techniczny.

Analizę przeprowadzono na przykładzie rezultatów eksperymentów diagnostycznych przeprowadzonych na stanowisku do badań wytrzymałości kół zębatych pracującym w układzie z mocą krążącą. Stanowisko wyposażone było w dwukanałowy układ telemetryczny produkcji ESA Messtechnik GmbH [1] pozwalający na transmisję

danych z elementów wirujących. Podczas pracy rejestrowano przebiegi: przyspieszeń drgań korpusu, momentu skręcającego na wale zębnika, naprężeń w podstawie jednego z zębów zębnika, prędkości obrotowej wału zębnika oraz impulsy synchronizujące z czujnika indukcyjnego umieszczonego na wale zębnika. Naprężenia w podstawie zęba mierzono za pomocą tensometru naklejonego u podstawy zęba na jego powierzchni czołowej, moment skręcający za pomocą naklejonych na wale zębnika tensometrów, zaś chwilową prędkość obrotową wału zębnika za pomocą prądniczki tachometrycznej prądu stałego (33 bieguny). Badana przekładnia była wyposażona w koła zębate o zębach prostych o module 4 mm mające 27 (zębnik) i 35 (koło) zębów. Eksperymenty prowadzono aż do całkowitego wyłamania zęba.

Jako układ odniesienia przyjęto odpowiedź dynamiczną przekładni uzyskaną w początkowej fazie eksperymentu laboratoryjnego.

2. ANALIZA LOKALNYCH NIESTACJO- NARNOŚCI W SYGNALE UŚREDNIONYM SYNCHRONICZNIE

Zarejestrowane sygnały były przepróbkowywane (interpolowane do jednakowej długości) w celu kompensacji zmian prędkości obrotowej i uzyskania

jednakowych liczb próbek dla wszystkich obrotów wału zębnika. Wykorzystano do tego celu impulsy synchronizujące z czujnika indukcyjnego umieszczonego na wale zębnika. Impulsy te pozwoliły ponadto na określenie umownych początków każdego obrotu wału zębnika.

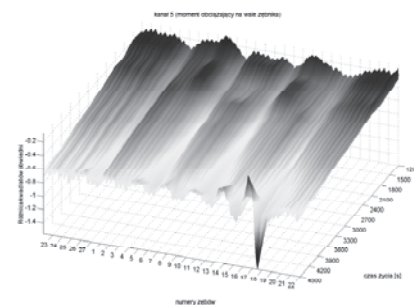
2.1. Zmiany obwiedni sygnału spowodowane uszkodzeniem zmęczeniowym zęba

Sygnały zarejestrowane podczas kolejnych pomiarów poddano uśrednianiu synchronicznemu z obrotami wału zębnika. Pozwoliło to na usunięcie z sygnałów wszelkich zakłóceń nie związanych z pracą zębnika. Dla tak przetworzonych sygnałów obliczono ich obwiednie korzystając z transformaty Hilberta w sposób opisany w [2]. Następnie kwadraty obwiedni porównano z wynikiem uzyskanym po okresie początkowego docierania przekładni (pomiar nr 4).

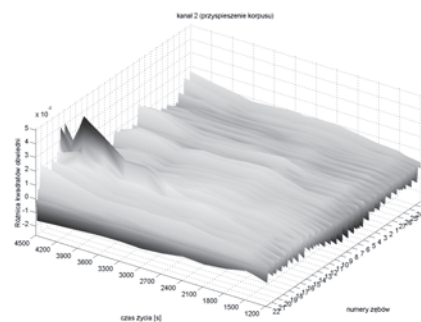
Rysunek 1 przedstawia zmianę przebiegu obwiedni uśrednionego sygnału z zarejestrowanymi chwilowymi zmianami momentu obciążającego wał zębnika na długości jednego obrotu w czasie pracy przekładni. Począwszy od rejestracji wykonanej w 3300 [s] obciążenie zęba nr 18 jest coraz mniejsze (aczkolwiek spadek ten jest bardzo powolny). Ostatnia rejestracja wykonana bezpośrednio przed całkowitym wyłamaniem zęba wskazuje na gwałtowny spadek obciążenia na uszkodzonym zębie spowodowany jego większą podatnością (mniejszą sztywnością). Większa podatność tego zęba powoduje, iż następną parą zębów musi przenieść dodatkowy, większy moment spowodowany większym impulsem siły w chwili jej wejścia w przypór. Niestety jak to widać na rys. 1 zmiany te, poza chwilą bezpośrednio poprzedzającą całkowite wyłamanie, są zbyt małe aby parametr ten można było wykorzystać do wczesnego wykrycia zmęczeniowego pęknięcia zęba.

Tę samą operację powtórzono w przypadku pomiaru przyspieszeń drgań korpusu. Wynik przedstawiony na rys. 2 pozwala na stwierdzenie, że począwszy od 3000 [s] dają się zauważyć zmiany we współpracy zęba nr 18.

W przypadku sygnału pochodzącego z prądniczki tachometrycznej mierzącej chwilową prędkość obrotową wału zębnika nie udało się uzyskać tak jednoznacznych rezultatów. Poziom obwiedni dla zęba nr 18 praktycznie nie zmieniał się w czasie eksperymentu.



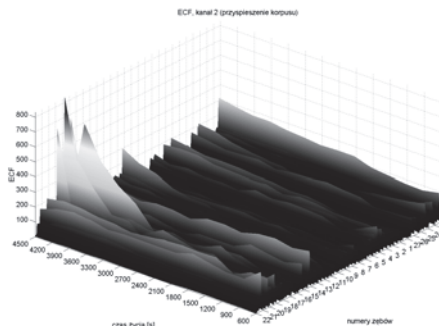
Rys. 1. Zmiana różnic kwadratów obwiedni momentu obciążającego wał zębnika w czasie pracy przekładni



Rys. 2. Zmiana przebiegu obwiedni przyspieszeń korpusu w czasie pracy przekładni

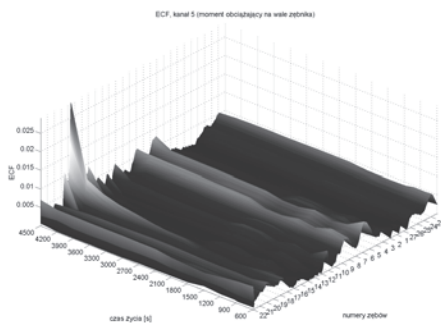
2.2. Analiza obwiedniowego wskaźnika przyporu (ECF).

W pracy [3] zaproponowano definicję obwiedniowego wskaźnika przyporu, nazwanego ECF, pozwalającego na porównywanie ze sobą kolejnych przyporów zębów w przekładni. Wskaźnik ten, zmienny w czasie, obliczany jako różnica kwadratów uśrednionych synchronicznie przebiegów obwiedni dla sąsiednich przyporów w kolejnych chwilach czasowych, pokazuje różnice pomiędzy współpracą zębów (różnice siły międzyzębnej) w sąsiednich przyporach spowodowane błędami podziałki, różnicami sztywności zębów, uszkodzeniami zmęczeniowymi i wszelkimi niedokładnościami wykonania.

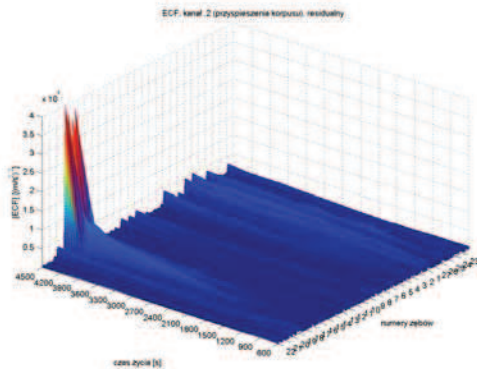


Rys. 3. Wartości obwiedniowego wskaźnika przyporu ECF obliczone dla przyspieszeń korpusu w czasie pracy przekładni

Różnice w warunkach kontaktów kolejnych zębów wchodzących w przypór dają w efekcie przyrost dynamicznego obciążenia zębów i wzrost naprężeń w ich podstawie. Im większa jest zmienność wskaźnika tym bardziej obciążona jest odpowiednia para zębów i tym większe prawdopodobieństwo, że awaria (o ile w przyszłości wystąpi) nastąpi właśnie w tym miejscu. Rezygnując z uśredniania synchronicznego (przy zachowaniu wyrównywania czasu trwania poszczególnych obrotów) i rejestracji impulsów synchronizujących pochodzących od obu wałów przekładni wskaźnik ten może być tabelaryzowany dla kolejnych, współpracujących par zębów pozwalając na określenie najbardziej niekorzystnego wariantu przyporu we współrzędnych „ząb zębniaka – ząb koła”.



Rys. 4. Wartości wskaźnika ECF obliczone dla obwiedni momentu obciążającego wał zębniaka w czasie pracy przekładni

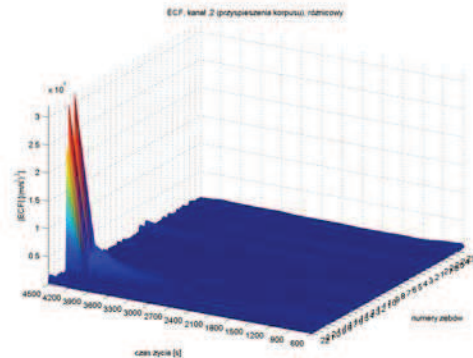


Rys. 5. Wartości obwiedniowego wskaźnika przyporu ECF obliczone dla sygnału residualnego obwiedni przyspieszeń korpusu w czasie pracy przekładni

Na rysunkach 3 i 4 pokazano przebiegi zmian wskaźnika ECF dla jednego obrotu zębniaka w czasie zużywania się przekładni. Najlepszą zmienność parametru uzyskano dla sygnału przyspieszeń drgań korpusu (rys. 3). Wskaźnik dla momentu obciążającego wał zębniaka (rys. 4) pokazał istotną zmianę wielkości dopiero bezpośrednio przed całkowitym wyłamaniem zęba. Należy w tym

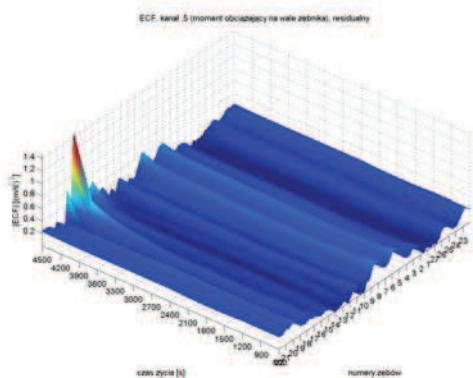
miejscu zwrócić uwagę na fakt, że z uwagi na sposób obliczania wskaźnika (różnica obwiedni sygnałów na kolejnych dwóch wchodzących w przypór zębach) wnioskowanie o dokładnym położeniu uszkodzonego zęba jest tu utrudnione.

W dalszym etapie zbadano zmienność wskaźnika ECF dla innych postaci analitycznych sygnałów - residualnego i różnicowego sygnału przyspieszeń drgań korpusu (rys. 5 i 6) oraz momentu obciążającego wał zębniaka (rys. 7 i 8).

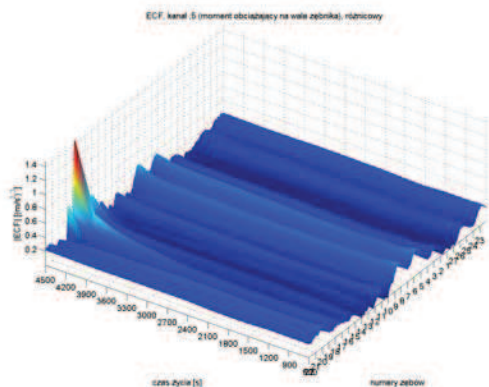


Rys. 6. Wartości obwiedniowego wskaźnika przyporu ECF obliczone dla sygnału różnicowego obwiedni przyspieszeń korpusu w czasie pracy przekładni

Sygnał różnicowy powstaje poprzez usunięcie z sygnału podstawowego (uśrednionego synchronicznie wałem zębniaka) składowych częstotliwościowych będących harmonicznymi częstotliwości ząbienia, natomiast różnicowy poprzez dodatkowe usunięcie prążków widmowych modulujących harmoniczne częstotliwości obrotowej wału zębniaka. W efekcie takiego postępowania uzyskano zmniejszenie wahań zmienności wskaźnika ECF zwłaszcza dla sygnału przyspieszeń korpusu (rys. 5, 6) co pozwoliło na wcześniejsze dostrzeżenie zmian związanych z postępującym uszkodzeniem zęba.



Rys. 7. Wartości wskaźnika ECF obliczone dla sygnału residualnego obwiedni momentu obciążającego wał zębniaka w czasie pracy przekładni



Rys. 8. Wartości wskaźnika ECF obliczone dla sygnału różnicowego obwodni momentu obciążającego wał zębniaka w czasie pracy przekładni

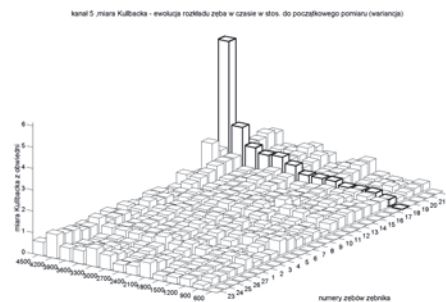
3. ANALIZA LOKALNYCH NIESTACJONARNOŚCI W SYGNALE NIEUŚREDNIONYM

Ponieważ zmiany momentu w uśrednionym sygnale poza okresem bezpośrednio poprzedzającym wyłamanie zęba są słabo zauważalne, postanowiono badać zmienność sygnału nie uśrednionego. W tym celu z obwodni sygnału nie uśrednionego wyselekcjonowano fragmenty w których pracuje ten sam ząb zębniaka tak, aby uwzględnić wszystkie warianty przyporów z różnymi zębami koła. Następnie dla tak utworzonych sygnałów obliczono miarę informacji Kullbacka [4] dla obwodni sygnałów dla każdego zęba osobno odnosząc kolejne pomiary do pomiaru początkowego po dotarciu:

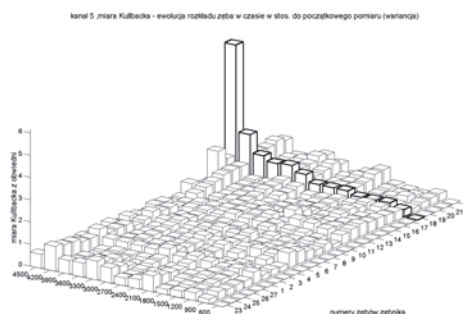
$$K(\Theta_1, \Theta_0) = \sum_{j=1}^n p_{j\Theta_1} \log \frac{p_{j\Theta_1}}{p_{j\Theta_0}} \quad (1)$$

We wzorze tym $p_{j\Theta_1}$ i $p_{j\Theta_0}$ oznaczają kolejne wartości gęstości prawdopodobieństwa dwóch porównywanych rozkładów amplitud dla pomiarów w chwilach Θ_1 i Θ_0 . Łatwo zauważyć, że dla identycznych wartości gęstości prawdopodobieństwa miara ta jest równa 0, oraz im wartość $p_{j\Theta_1}$ jest mniejsza, tym różnica rozkładów ma mniejsze znaczenie.

Tak obliczona miara informacji Kullbacka pozwala na określenie, jak dalece zmienił się rozkład amplitud obwodni w czasie przyporu określonego zęba zębniaka w stosunku do stanu początkowego. Wynik obliczeń dla przyspieszeń korpusu przedstawiono na rys. 9 zaś dla chwilowych zmian momentu obciążającego wał zębniaka na rys. 10. Jak widać trend narastający daje się już zauważyć począwszy od pomiaru w 2100 [s], czyli dwukrotnie wcześniej niż w przypadku obserwacji obwodni sygnałów.



Rys. 9. Zmiana miary Kullbacka obwodni sygnału przyspieszeń korpusu w czasie pracy przekładni



Rys.10. Zmiana miary Kullbacka obwodni momentu obciążającego wał zębniaka w czasie pracy przekładni

4. MIARY KULLBACKA W DIAGNOSTYCZNYM MODELU ZMĘCZENIOWEGO PĘKNIĘCIA ZĘBA U PODSTAWY

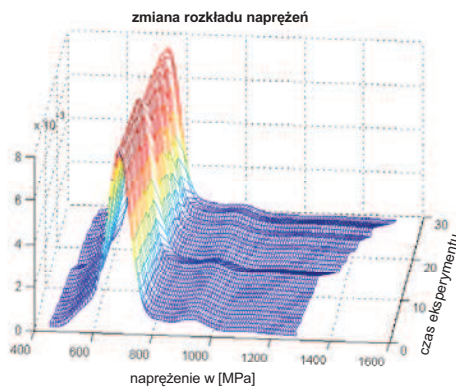
Inną miarą stanu technicznego przekładni zębatej może być zmiana naprężeń w kole zębatach. Postanowiono więc sprawdzić użyteczność różnych parametrów opisujących zmiany naprężeń w stopie zęba. Ze względu na istotne techniczne trudności związane z wykonywaniem pomiarów naprężeń w stopie zęba koła zębatego postanowiono sprawdzić czy istnieje możliwość opisu zmian struktury naprężeń zmianami występującymi w sygnale wibroakustycznym generowanym przez przekładnię zębatą. Umożliwiłoby to śledzenie zmian naprężeń koła zębatego na podstawie analizy sygnału SWA przekładni.

W tym celu przeprowadzono analizę porównawczą parametrów statystycznych, odnoszących się zarówno do przebiegów jak i rozkładów, naprężeń u podstawy zęba i trzech postaci analitycznych sygnału wibroakustycznego oraz obwodni sygnału odfiltrowanego w pasmach obejmujących 1 lub 3 częstości obrotowe zębniaka wokół odpowiednio pierwszych 8-miu harmonicznych częstotliwości zazębienia. Pierwszy z analizowanych sygnałów to opisany wcześniej sygnał podstawowy, drugi to sygnał residualny zaś trzeci z sygnałów to sygnał różnicowy. Czwarty to

obwiednia sygnału odfiltrowanego wokół odpowiednich harmonicznycy częstotliwości zazębienia w wybranych pasmach.

Analizowano dwie postacie miary Kullback'a, jedna uwzględniająca tylko zmiany wariancji, druga dodatkowo analizująca zmiany wartości średniej opisane dokładnie w pracy [5].

W wyniku przeprowadzonej wstępnej analizy okazało się, że w trakcie całego eksperymentu nie występuje istotna zmiana wartości średniej naprężeń, natomiast informacja o zbliżeniu się do chwili wyłamania zęba zawarta jest w zmianie rozproszenia próbki. Potwierdzeniem tego spostrzeżenia jest obserwacja zmiany rozkładu amplitud naprężeń (rys. 11).

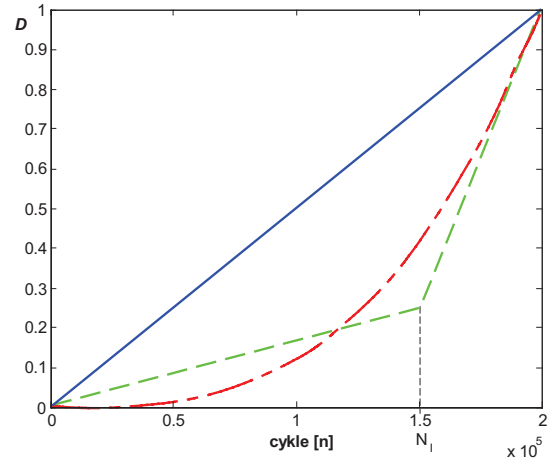


Rys. 11. Zmiana rozkładu amplitud naprężeń w stopie zęba podczas eksperymentu

Diagnostycznie użyteczne okazały się parametry odnoszące się do zmian wyższych momentów. Jest to spowodowane tym, że wraz z inicjacją i później rozwojem pęknięcia zmęczeniowego pojawiają się coraz większe zmiany w strukturze naprężeń w stopie uszkodzonego zęba wynikającą ze zmiany jego sztywności. Zwiększanie zaburzenia obciążenia na odcinku przyporu powoduje coraz bardziej udarową współpracę kół zębatach, objawiającą się zaburzeniami prędkości obrotowej wałów współpracujących kół. W sygnale drganiowym obudowy przekładni pojawia się coraz większa wartość maksymalnych amplitud.

Powiększająca się nieliniowość jednoznacznie sugeruje poszukiwanie informacji diagnostycznej o zbliżającym się wyłamaniu w pasmach częstotliwości związanych z modulacjami pochodzącymi od wałów współpracujących kół zębatach. Stąd też kolejne fazy uszkodzenia najwyraźniej wskazują parametry obliczone dla residualnego i różnicowego sygnału drganiowego oraz obwiedni sygnału odfiltrowanej w pasmach wokół wyższych harmonicznycy zazębienia obejmujących modulacje prędkościami obrotowymi wałów. do opisu zmian sygnału wibroakustycznego zastosowano funkcję regresji wielorakiej opisującą zmianę miary Kullbacka z naprężeń poprzez zmianę tejże miary sygnału residualnego i obwiedni sygnału

wibroakustycznego odfiltrowanej wokół odpowiednio 4, 5 i 6 harmonicznycy częstotliwości zazębienia w paśmie 60Hz.. tak zdefiniowana miara stała się podstawą do stworzenia diagnostycznego modelu zmęczeniowego pęknięcia zęba u podstawy przedstawionego na rysunku 12 [7].

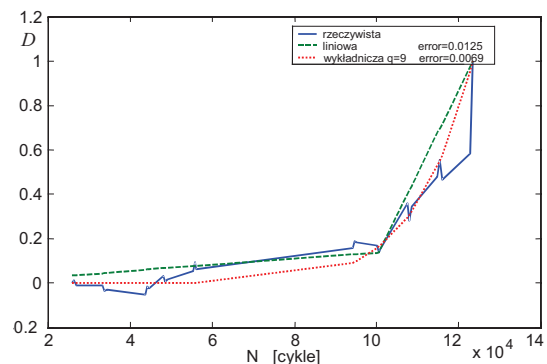


Rys. 12. Wibroakustyczne modele diagnostyki zmęczeniowego wyłamania zęba w przekładni zębatach

Najlepsze wyniki osiągnięto dla przypadku wyłamania zęba bez pittingu, ponieważ rozwijający się pitting zakłóca analizowane pasmo częstotliwości.

Podkreślić należy fakt, iż we wszystkich omawianych przypadkach zęb, który uległ wyłamaniu podczas eksperymentu nie był tym, na którym naklejono tensometry.

Przeprowadzone analizy wykazały możliwość diagnozowania stanów awaryjnych kół zębatach dla różnych typów uszkodzania zęba a dla przebiegu zmian przyjętej miary przedstawionego na rysunku 13 dzięki łagodnemu przejściu z fazy prawidłowej pracy przekładni w fazę inicjacyjną pęknięcia można wyróżnić okresu inicjacji i propagacji.



Rys. 13. Zmiana znormalizowanej miary wielkości uszkodzenia zęba opartego na funkcji regresji wielorakiej z miary Kullbacka

5. PODSUMOWANIE

Zastosowane metody analizy sygnałów pozwoliły na znalezienie w sygnale tych fragmentów w których nastąpiło zaburzenie jego parametrów. Zaburzenia te spowodowały zmiany wartości oraz typu funkcji opisującej rozkład prawdopodobieństwa wielkości obwiedni sygnału, zaś miejsce ich wystąpienia w sygnale wskazuje na dużą korelację z miejscem wystąpienia uszkodzenia. Zwraca uwagę fakt, że podobne rezultaty uzyskano różnymi metodami, zarówno odwołującymi się do porównywania obwiedni sygnału na całym obrocie zębniaka jak też do porównywania rozkładów wyselekcjonowanych fragmentów tych obwiedni.

Przebieg momentu obciążającego na wale zębniaka również wykazuje trend rosnący lecz wyraźny wzrost następuje dopiero bezpośrednio przed samym wyłamaniem zęba co sugeruje zmniejszenie sztywności zęba w wyniku przejścia z fazy inicjacji do fazy propagacji szczeliny zmęczeniowej.

Zmiany parametrów rozkładów prawdopodobieństwa zaobserwowane tak w przypadku naprężeń jak i wybranych parametrów mierzonych na obudowie przekładni sygnału wibroakustycznego potwierdzają tezę o istnieniu skorelowania pomiędzy naprężeniami, a zmianami struktury częstotliwościowej sygnału wibroakustycznego.

Opisywane metody mogą znaleźć zastosowanie w wykrywaniu wczesnych faz rozwoju uszkodzeń w tych przypadkach, w których rozwój uszkodzenia powoduje zmianę funkcji gęstości prawdopodobieństwa parametrów sygnału.

Szczególnie cennym z tego punktu widzenia jest wykrycie zależności pomiędzy ewolucją rozkładu prawdopodobieństwa wartości amplitud w pasmach zmodulowanych wyższych harmonicznymi częstotliwości zazębienia, a zmianami rozkładu amplitud naprężeń koła zębatego. Stanowi to bezpośrednie potwierdzenie przyjętej tezy o występowaniu informacyjnie istotnych zmian w widmie sygnału wibroakustycznego i rozwijającym się efekcie zmodulowania, spowodowanych zwiększającym się oddziaływaniem czynników stochastycznych w miarę rozwoju procesu zniszczenia zmęczeniowego.

6. LITERATURA

1. Radkowski S., Zawisza M.: Wykorzystanie sygnału wibroakustycznego w badaniu powstawania i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego u podstawy zęba w przekładni zębatej. XXX Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2003.
2. Mączak J.: Wykorzystanie zjawiska modulacji sygnału wibroakustycznego w diagnozowaniu przekładni o zębach śrubowych. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, 1998.

3. Mączak J., Radkowski S.: Use of envelope contact factor in fatigue crack diagnosis of helical gears. *Machine Dynamics Problems*, vol. 26. 2002, s. 115-122.
4. Mączak J.: Miara informacji Kullbacka w wykrywaniu efektów niestacjonarnych w układach mechanicznych. XXI Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn, Ustroń 2003, tom II. s. 71-76.
5. RADKOWSKI S., 2002, Niezawodnościowo - zorientowana diagnostyka wibroakustyczna, XXX Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk, 348÷360.
6. QIU CH. ZHANG J., SETH B.B., LIANG S., 2002, *Damage Mechanics Approach for Bearing Lifetime Prognostics*, *Mechanical systems and Signal Processing* vol. 15 nr 5, str. 817÷829.
7. ZAWISZA M., 2003, Wykorzystanie informacji zawartej w sygnale wibroakustycznym do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia awarii w przekładni zębatej, Rozprawa doktorska Politechniki Warszawskiej.



Dr inż. Maciej ZAWISZA jest adiunktem w Instytucie Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej, członek PTDT. Obecnie zajmuje się diagnostyką maszyn., w szczególności diagnostyką procesów zmęczeniowych w przekładniach zębanych.

Dr inż. Jędrzej MĄCZAK jest adiunktem w Instytucie Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej, członek PTDT. W pracy naukowej zajmuje się diagnostyką maszyn, modelowaniem matematycznym układów napędowych i metodami analizy sygnałów wibroakustycznych.

