

ZASTOSOWANIE ANALIZY DRÓG ROZCHODZENIA SIĘ ENERGII W KONSTRUKCJACH DO DIAGNOSTYKI REDUKTORA

Krzysztof MENDROK, Tadeusz UHL

Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn, Akademia Górniczo Hutnicza
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, fax: +48 12 634 35 05, mendrok@agh.edu.pl

Streszczenie

Analiza dróg rozchodzenia się energii w konstrukcjach jest jedną z technik wykorzystujących model modalny konstrukcji. Pozwala ona na oszacowanie udziału poszczególnych punktów łączących tzw. ścieżek przejścia w transferze energii drgań od źródła do kierunku oceny. Ponieważ technika ta łączy zalety metod diagnostycznych opartych na modelu modalnym i metod opartych na analizie widma drgań układu, podjęto próbę wykorzystania jej do diagnozowania stanu konstrukcji. Testowanym urządzeniem był reduktor jednostopniowy, dla którego przeprowadzono analizę rozchodzenia się energii przy różnym stopniu uszkodzenia. W pracy zaprezentowano zaproponowany algorytm diagnostyczny, sposób przeprowadzenia eksperymentu oraz wyniki przeprowadzonych analiz.

Słowa kluczowe: Analiza dróg rozchodzenia się energii, Model modalny, Analiza modalna

APPLICATION OF TRANSFER PATH ANALYSIS TO REDUCTION GEAR DIAGNOSTICS

Summary

Transfer path analysis is one of techniques based on construction modal model. It allows assessing a contribution of an energy transfer for each transfer path. This technique has advantages of both, modal model based diagnostics procedures and methods based on the vibration spectrum analysis. That is why the trial of its application to a construction stage diagnostics has been taken. A testing machine was single stage reduction gear. The transfer path analysis for this machine was performed for different damage level. In the paper diagnostic algorithm is presented. An experiment and its results are also described.

Keywords: Transfer path analysis, Modal model, Modal analysis

1. WPROWADZENIE

Algorytmy analizy dróg rozchodzenia się energii drgań zwane algorytmami TPA (z ang. Transfer Path Analysis) służą do oceny komfortu w konstrukcjach środków transportu. Pozwalają na określenie wpływu poszczególnych źródeł drgań występujących w układzie na poziom drgań w założonych miejscach, zwanych w terminologii algorytmów TPA kierunkami oceny. Na podstawie takiej analizy można też ocenić udział poszczególnych ścieżek przejścia energii drgań w jej transporcie od źródeł do kierunków oceny [1], [5]. Podstawowa metodologia bazuje na dynamicznym modelu konstrukcji, który wprowadza związek pomiędzy wektorem wymuszeń $\{f(\omega)\}$, a wektorem odpowiedzi w kierunkach oceny $\{p(\omega)\}$, wykorzystując macierz widmowych funkcji przejścia (WFP) – $[H(\omega)]$ [1], [5]:

$$\{p(\omega)\} = [H(\omega)] \cdot \{f(\omega)\} \quad (1)$$

Różne typy wymuszeń i kierunków oceny są traktowane jako dwa różne podukłady. Podukłady te związane są ze sobą przez pewną liczbę mniej lub

bardziej sztywnych połączeń, tworzących ścieżki przejścia. Jeżeli system składa się z N ścieżek przejścia, wtedy całkowita odpowiedź w kierunku oceny może być zapisana jako suma cząstkowych odpowiedzi z poszczególnych ścieżek:

$$p(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{P(\omega)}{F_i(\omega)} f_i(\omega) \quad (2)$$

gdzie: $p(\omega)$ – odpowiedź w kierunku oceny,

$\frac{P(\omega)}{F_i(\omega)}$ – to WFP pomiędzy kierunkiem oceny,

a źródłem dla ścieżki przejścia i .

$f_i(\omega)$ – siła dla ścieżki przejścia i .

Aby przeprowadzić analizę rozchodzenia się energii w konstrukcjach musimy zestawić kompletną macierz widmowych funkcji przejścia. Widmowe funkcje przejścia muszą zostać zarejestrowane lub musi być dokonana ich synteza dla wszystkich ścieżek przejścia do danego kierunku oceny. Dodatkowo potrzebny jest pomiar sił działających w ścieżkach przejścia. Gdy ta informacja jest niedostępna, siły mogą zostać zidentyfikowane na

Tabela 1. Zestawienie parametrów zidentyfikowanego modelu modalnego

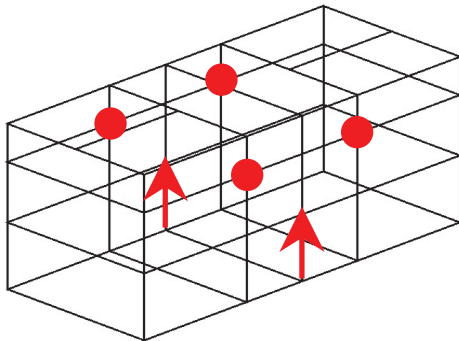
Nr PDW	Częstotliwość drgań wł. [Hz]	Współczynnik tłumienia mod.
1	745.89	1.82
2	890.25	0,41
3	946.92	1.99

Zidentyfikowany model posłużył do syntezy WFP niezbędnych do przeprowadzenia analizy dróg rozchodzenia się energii drgań, a niemierzalnych eksperymentalnie.

W celu przeprowadzenia analizy rozchodzenia się energii drgań w reduktorze przyjęto następujące założenia:

- źródło drgań generowanych w obiekcie – współpraca kół zębatych i drgania dostarczane do układu przez wał napędowy,
- ścieżki przejścia – węzły łożyskowe reduktora – 4 łożyska po 2 kierunki w każdym, razem 8 ścieżek przejścia,
- kierunki oceny – 2 punkty mocowania reduktora do podstawy w kierunku pionowym.

Zdecydowano się pominąć kierunek wzdłużny jako ścieżkę przejścia energii, ze względu na to, że badany reduktor ma zęby proste i siła wzdłużna w łożyskach jest znikoma w porównaniu ze składowymi poprzecznymi. Zarówno ścieżki przejścia jak i kierunki oceny zaznaczono na siatce punktów pomiarowych przyjętej dla obiektu i przedstawiono na rysunku 3. Dla tak przyjętych założeń dokonano syntezy WFP tworząc macierz o wymiarach 12 x 8.



Rys. 3. Założone ścieżki przejścia i kierunki oceny

Następnie przeprowadzono test eksploatacyjny, mający na celu rejestrację drgań układu podczas procesu wyłamania zęba. Badania wykonano na stanowisku mocy zamkniętej z następującymi parametrami:

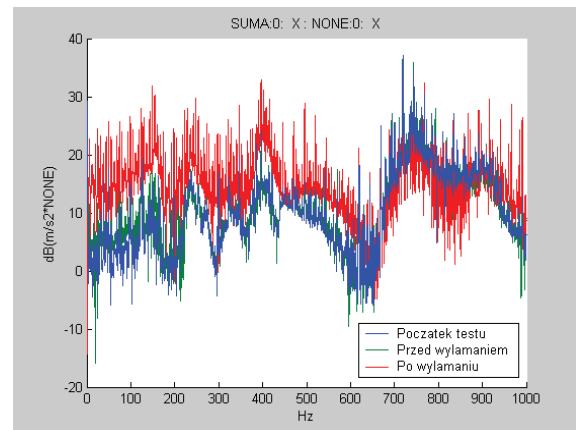
- obroty wejściowe – 1490 obr/min
- moment na wale – 950 Nm
- moc podczas badań – 73 kW

Obciążenie takie osiągnięto przez wstępne skręcenie wałów łączących reduktory stanowiska mocy zamkniętej. W badanym reduktorze zębnik wykonany był ze stali 17HNM. Dla tego materiału i

obciążenia pęknięcie podstawy zęba nastąpiło po około 100000 cykli. Podczas testu eksploatacyjnego rejestrowano przyspieszenia drgań konstrukcji w 12 punktach i kierunkach pomiarowych (8 ścieżek przejścia, 2 kierunki oceny i 2 punkty nadmiarowe w celu lepszego uwarunkowania numerycznego zagadnienia).

4. ANALIZA WYNIKÓW

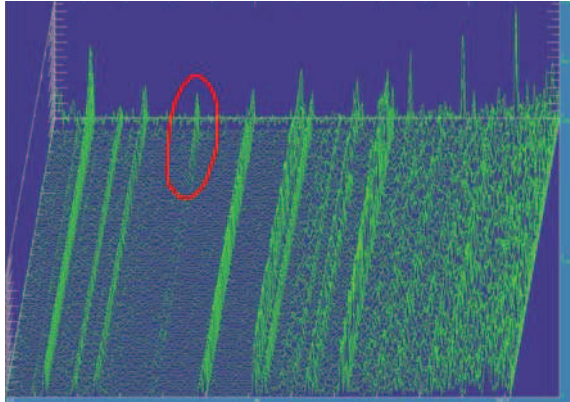
Zgodnie z przyjętymi założeniami przeprowadzono analizę rozchodzenia się energii w konstrukcjach dla danych zebranych w trzech chwilach czasu: na początku eksperymentu, tuż przed wyłamaniem i po wyłamaniu. Obliczenia przeprowadzono przy pomocy autorskiego oprogramowania dedykowanego do algorytmów TPA. Sposób przeprowadzenia analizy przyjęto analogiczny jak we wstępnym eksperymencie opisanym szerzej w pracy [7]. Na rysunku 4 zamieszczono udział ścieżek przejścia reprezentowanych przez łożysko 1 (przednie na wale czynnym), dla trzech analizowanych okresów czasu.



Rys. 4. Udział łożyska 1 w transporcie energii drgań dla trzech etapów próby

Nawet przy tak znacznej redukcji danych, na przedstawionych przebiegach rozpoznawalna jest jedynie istotna zmiana, która nastąpiła po pęknięciu zęba. Mniej znaczące zmiany wynikające z procesu inicjacji uszkodzenia mogą łatwo zostać pominięte. Wyników analizy jest dużo i ich analiza wymaga czasu oraz doświadczenia. Należy więc otrzymane przebiegi opracować w taki sposób, aby możliwe było skuteczne i szybkie wykrycie powstającego uszkodzenia. Na podstawie analizy widm dynamicznych wyliczanych co 10 sekund z przebiegów czasowych przyspieszenia drgań zauważono, że wraz z procesem wzrostu pęknięcia podstawy zęba różnie wartość przyspieszenia drgań w częstotliwości odpowiadającej trzeciej harmonice. Na rysunku 5 zamieszczono przykład omawianego widma dynamicznego. Następnie wykonano obliczenia dla widm sygnałów zarejestrowanych w 4 chwilach czasu przed i 1 po pęknięciu i porównano rezultaty dla częstotliwości 74,5 Hz odpowiadającej

trzeciej harmonicznej prędkości obrotowej wału atakującego. Otrzymane wyniki zebrano w tabeli 2.



Rys. 5. Widmo dynamiczne rejestrowanego nałożysku 1

Tabela 2. Zestawienie wyników analizy dla częstotliwości 74,5 Hz

Łoży - sko	Pocz. testu	20 min. przed p.	5min. przed p.	15 s przed p.	Po pęk.
Ł 1	0,094	0,74	0,97	6,68	43,61
Ł 2	0,21	0,3	0,33	3,42	19,58
Ł 3	0,057	0,54	0,61	4,28	15,9
Ł 4	0,19	0,19	0,33	1,04	47,51

Dla uszkodzenia typu wyłamanie zęba wzrost amplitudy drgań został zarejestrowany na wszystkichłożyskach dlatego wartości zmian dla każdego z nich są zbliżone i nie niosą informacji o miejscu uszkodzenia. Należy jednak przypuszczać, że przy uszkodzeniu samegołożyska lub pęknięciu korpusu, metoda może skutecznie wskazać miejsce awarii. Teżę taką należy jednak sprawdzić doświadczalnie w większej liczbie eksperymentów.

5. PODSUMOWANIE

W przedstawionym artykule pokazano próbę wykorzystania analizy dróg rozchodzenia się energii drgań w reduktorze badawczym SBJ 2 do jego diagnostyki. Zastosowanie tej techniki do wykrywania uszkodzeń zostało podyktowane potencjalną jej wrażliwością na różne typy awarii. W celu ułatwienia interpretacji wyników porównywano rezultaty tylko w jednej częstotliwości 74,5 Hz – wrażliwej na uszkodzenie rozważanego typu. Zaproponowane wykorzystanie algorytmów TPA do diagnostyki zostało zweryfikowane eksperymentalnie. Metoda umożliwiła wykrycie wyłamania zęba w zębniku. W dalszych krokach należy przeprowadzić eksperymenty z innymi typami uszkodzeń, aby zweryfikować potencjalną wszechstronność opisaney techniki.

Autorzy dziękują komitetowi badań naukowych za finansowanie badań w ramach projektu badawczego nr 5T07C01023.

LITERATURA

- [1] Plunt J., Strategy for transfer path analysis (TPA) applied to vibro-acoustic systems at medium and high frequencies, Proceeding of 23rd ISMA, Leuven, 1996.
- [2] Uhl T., Komputerowo wspomaganą identyfikacją modeli konstrukcji mechanicznych, WNT Warszawa 1997.
- [3] Uhl T., Lisowski W., Kurowski P.: In-Operation modal analysis and its applications, Wydawnictwo AGH, Kraków 2001.
- [4] Uhl T., Współczesne trendy rozwojowe systemów monitorowania i diagnostowania maszyn, PAK, no.4, 1999.
- [5] Uhl T., Lisowski W., Mendrok K., Chudzikiewicz A., Vibration energy flow analysis in vehicles with use of the TPA method in application to structural modification, Machines Dynamic Problems, Vol. 26, No. 2/3, 2002
- [6] Uhl T., Zastosowanie analizy modalnej w diagnostyce konstrukcji, Zagadnienia Analizy Modalnej Konstrukcji Mechanicznych, str. 277–294, Wydawnictwo KRiDM AGH Kraków, 2003
- [7] Mendrok K., Tomaszewski J., Cieślak J., Uhl T., Analiza rozchodzenia się energii w reduktorze pod kątem jego diagnostyki, Zagadnienia Analizy Modalnej Konstrukcji Mechanicznych, str. 187–194, Wydawnictwo KRiDM AGH Kraków, 2003



Prof. dr hab. inż. Tadeusz UHL jest kierownikiem Katedry Robotyki i Dynamiki Maszyn, Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami dynamiki konstrukcji, a zwłaszcza ich analizy modalnej. Jego zainteresowania obejmują także układy aktywnej redukcji drgań, układy sterowania i szeroko pojętą mechatronikę. Jest autorem 15 książek i kilkuset artykułów dotyczących wspomnianych zagadnień.



Dr inż. Krzysztof MENDROK jest adiunktem w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn, Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie. Jego zainteresowania skupiają się na zagadnieniach dynamiki strukturalnej, a zwłaszcza na algorytmach analizy modalnej i analizy dróg rozchodzenia się energii drgań w konstrukcjach. Zajmuje się wykorzystaniem tych metod do wykrywania uszkodzeń. Jest autorem prac podejmujących tę tematykę.