Bogusław ŁAZARZ, Grzegorz WOJNAR

WYKORZYSTANIE ESTYMACJI OPÓŹNIENIA CZASOWEGO W PRZYPADKU UŚREDNIANIA SYGNAŁU DRGANIOWEGO PRZEKŁADNI ZĘBATEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę przydatności różnych metod estymacji opóźnienia czasowego do korekcji położenia impulsu synchronizującego w przypadku uśredniania sygnału drganiowego użytego w procesie diagnozowania przekładni zębatej.

THE UTILIZATION OF TIME-DELAY ESTIMATION IN CASE AVERAGE TOOTHED GEAR VIBRATION SIGNAL

Summary. The paper presents analysis different methods time delay estimation to correct position synchronizing impulse in case average vibration signal used in diagnostics process of toothed gears.

1. WSTĘP

W maszynach wirnikowych pewne procesy powtarzają się cyklicznie. W przypadku przekładni zębatych o osiach stałych są to: okres wchodzenia w przypór tej samej pary zębów, okres obrotu wału zębnika lub koła oraz okres zazębiania związany z częstotliwością zazębiania. W diagnostyce technicznej maszyn i urządzeń posiadających elementy wirujące celem poprawienia stosunku sygnału do szumu i usunięcia składowych nie związanych z okresem obrotu wybranego elementu stosuje się uśrednianie synchroniczne [1, 3, 4]. Często próbuje się wykrywać uszkodzenia wybranych elementów diagnozowanego obiektu i wtedy należy określić okres obrotu diagnozowanego elementu oraz okres, z jakim uszkodzenie będzie generować zaburzenia mierzonego sygnału drganiowego. Zastosowanie w tym przypadku uśredniania synchronicznego w odpowiednim okresie spowoduje zmniejszenie wpływu zaburzeń nie związanych z uszkodzeniem. Tym samym wnioskowanie o pojawieniu się uszkodzenia na podstawie sygnału uśrednianego będzie bardziej efektywne. Należy jednak pamiętać, że stosując przykładowo w przekładni zębatej o osiach stałych uśrednianie synchroniczne związane z okresem obrotu wału zębnika tracimy informacje związane z okresem obrotu wału koła i odwrotnie z wyjątkiem przypadku, gdy przełożenie wynosi 1. W przemysłowych przekładniach zębatych ze względów konstrukcyjnych znacznik uśredniania najłatwiej jest umieścić na wale wyprowadzonym na zewnątrz przekładni. Oddalenie znacznika od diagnozowanego koła, drgania skrętne w układzie wałów przekładni i często zbyt wolno narastające zbocze sygnału synchronizującego powodują, że impuls synchronizujący występuje przy położeniach kątowych koła różniących się o niewielką wartość. Różnice te są szczególnie istotne w przypadku składowych sygnału o wysokich częstotliwościach oraz przy diagnozowaniu lokalnych uszkodzeń kół generujących impulsowe zaburzenia, których czas trwania jest porównywalny z odchyłką występowania impulsu synchronizującego.

2. BADANIA LABORATORYJNE

Badania laboratoryjne prowadzono na stanowisku mocy krążącej przedstawionym na rys. 1 i opisanym w [2]. W przekładni badanej zamontowane były koła o zębach prostych. Szerokość zazębienia wynosiła 20 mm, moduł 4,5 mm, liczby zębów zębnika i koła odpowiednio 16 i 24, a współczynniki przesunięcia zarysu 0,8635 i -0,5. Celem badań było wykrywanie lokalnego wykruszenia zęba zębnika lub koła. Uszkodzenie to modelowano skracając wierzchołek zęba [5]. Mierzono nie tylko przyspieszenia drgań wybranych punktów obudowy przekładni i prędkości drgań poprzecznych jej wałów, ale również rejestrowano synchronicznie sygnały odniesienia zgodne z obrotami tychże wałów. Ze względów konstrukcyjnych znaczniki uśredniania były umieszczone na wejściowym i wyjściowym wale z przekładni. Podczas badań prędkość obrotowa zębnika wynosiła około 2700 obr/min. Przekładnia pracowała jako reduktor obciążony momentem M_2 =207 Nm. Sygnał z laserowego miernika prędkości drgań oraz z układu synchronizacji uśredniania próbkowano z częstotliwością 25600 Hz i zapisywano na dysku twardym komputera.



- Rys. 1. Schemat stanowiska mocy krążącej: 1 przekładnia zamykająca, 2 przekładnia badana, 3 – sprzęgło napinające, 4 – czujnik położenia kątowego wałów 5 – jednostka logiczna, 6 – analizator sygnałów DSPT SigLab, 7 – komputer, 8 – przetwornik przyspieszeń 9 – vibrometr laserowy OMETRON VH300+
- Fig. 1. Schematic diagram of instrumented gear test rig: 1 closing gear, 2 examined gear, 3 - tightening clutch, 4 - shaft angle position sensors, 5 - logic unit, 6 - DSPT SigLab signal analyzer, 7 - computer, 8 - accelerometer, 9 - laser vibrometer OMETRON VH300+

3. UŚREDNIANIE SYNCHRONICZNE SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH

Odchyłki wykonania elementów przekładni, a w szczególności kół zębatych utrudniają wykrywanie ich uszkodzeń [6]. Przykładowo para zębów obarczona dużą wypadkową odchyłką podziałki przy wejściu w przypór generuje impuls siły zbliżony do powstającego podczas współpracy kół z uszkodzonym zębem. Na jego wartość maksymalną oprócz wielkości uszkodzenia mają również wpływ odchyłki wykonania współpracujących zębów. Inny jest zatem przebieg rejestrowanych drgań przy wejściu w przypór zęba zębnika z uszkodzonym zębem koła, gdy sumaryczna odchyłka wykonania tej pary jest stosunkowo mała a inny w przypadku, gdy ta odchyłka jest większa. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowo przebieg prędkości drgań poprzecznych wału zębnika przekładni uśredniony

okresem jego obrotu, w przypadku znacznego wykruszenia zęba koła na głębokość 3 mm. Czołowa liczba przyporu ϵ_{α} w skutek wykruszenia zmniejszyła się z 1,33 do 0,71. W przebiegu tym widoczne są dwa lokalne maksima spowodowane wykruszeniem zęba koła współpracującego z różnymi zębami zębnika, różniące się amplitudą i czasem zaniku.



- Rys.2. Uśredniony okresem powtarzania skojarzeń sygnał prędkości drgań wału zębnika w funkcji kąta obrotu koła
- Fig.2. Pinion shaft vibration velocity signal averaged by repeated coupling period in function revolution gear

W praktyce diagnostycznej najczęściej mierzy się przyspieszenia drgań wybranych punktów obudowy. Wtedy różnice pomiędzy impulsami są jeszcze większe (rys. 3).



- Rys. 3. Uśredniony okresem powtarzania skojarzeń sygnał przyspieszeń drgań obudowy łożyska przekładni w funkcji kąta obrotu koła
- Fig. 3. Bearing housing vibration acceleration signal averaged by repeated coupling period in function revolution gear



W tym przypadku wykrycie uszkodzenia stanie się łatwiejsze na podstawie analizy sygnału uśrednionego synchronicznie okresem obrotu koła (rys.4).

Rys. 4. Uśredniony okresem obrotu wału koła sygnał przyspieszeń drgań obudowy łożyska przekładni Fig. 4. Bearing housing vibration acceleration signal averaged by revolution gear period

4. METODY ESTYMACJI PRZESUNIĘCIA CZASOWEGO

Jednym ze sposobów wykrywania uszkodzeń zębnika lub koła jest analiza sygnału uśrednionego synchronicznie odpowiednio okresem obrotu wału zębnika lub koła. Na skutek drgań skrętnych w układzie wałów oraz drgań korpusu przekładni w miejscu mocowania czujnika położenia kątowego wału następują pewne przesunięcia impulsu synchronizującego w stosunku do koła. Przesunięcia te mogą się zwiększać wraz ze wzrostem odległości znacznika od badanego koła. W warunkach przemysłowych ze względów technicznych często nie jest możliwe rejestrowanie sygnału odniesienia związanego bezpośrednio z kołem. Wtedy sygnał ten wiąże się z dostępnym na zewnątrz przekładni elementem wirującym.

Analizując nałożone na siebie uśredniane przebiegi czasowe prędkości drgań poprzecznych wału zębnika (rys. 5), gdy położenie impulsu synchronizującego nie było korygowane wstępnie, stwierdzono, że odchyłka położenia impulsu synchronizującego wynosiła ±2 okresy próbkowania, czyli około ±1° obrotu wału. Celem zminimalizowania wpływu odchyłki przeprowadzono obliczeniową koręktę położenia tei impulsu synchronizującego wykorzystując estymację opóźnienia czasowego pomiędzy kolejnymi zarejestrowanymi rekordami. Było to o tyle istotne, że czas trwania impulsu pochodzącego od uszkodzonego zęba wynosił około 0,12+0,16*10⁻³ [s], czyli 3+4 okresów próbkowania przy zastosowanej częstotliwości próbkowania. Z tego względu impuls synchronizacji uśredniania powinien być bardzo dokładnie skorelowany z położeniem kątowym koła, gdyż wystąpienie odchyłek jego położenia może doprowadzić do usunięcia z uśrednianego sygnału informacji o pojawiającym się uszkodzeniu.



- Rys. 5. Nałożenie uśrednianych przebiegów czasowych prędkości drgań poprzecznych wału zębnika położenie impulsu synchronizującego nie było korygowane, a) fragment sygnału od 15÷75 próbki, b) fragment sygnału od 405÷465 próbki, okres obrotu zębnika 572 próbki
- Fig. 5. Superposition designed to averaged pinion shaft transversal vibration velocity signals position synchronizing impulse was not corrected, a) fragment of signal: samples 15÷75, b) fragment of signal: samples 405÷465, pinion revolution period - 572 samples

Przed zastosowaniem estymacji przesunięcia czasowego wybrano rekord, względem którego określano przesunięcie czasowe. Był to rekord najlepiej skorelowany z pozostałymi. W celu określenia przesunięcia czasowego zastosowano trzy metody dostępne w systemie Matlab. Najpierw określono opóźnienie czasowe wykorzystując metodę kumulant trzeciego stopnia (TDE). W celu uzyskania najlepszych rezultatów do obliczania kumulanty stosowano następujące liczby próbek: $n_{samp} = 256$, 128, 64, 32, 16. Najlepsze wyniki uzyskano, gdy $n_{samp} = 32$ próbki (rys.6). W porównaniu z rysunkiem 5 widoczna była poprawa, jednakże wynik nie był jeszcze zadowalający.



- Rys. 6. Nałożenie uśrednianych przebiegów czasowych prędkości drgań poprzecznych wału zębnika - położenie impulsu synchronizującego było korygowane metodą TDE, n_{samp} = 32, a) fragment sygnału od 15÷75 próbki, b) fragment sygnału od 405÷465 próbki
- Fig. 6. Superposition designed to averaged pinion shaft transversal vibration speed signals position synchronizing impulse was corrected by method TDE, n_{samp} = 32, a) fragment of signal: samples 15÷75, b) fragment of signal: samples 405÷465

W kolejnym kroku zastosowano metodę określania opóźnienia czasowego bazującą na bispektrum (TDEB). W metodzie tej wpływ na uzyskiwane wyniki ma liczba próbek FFT (n_{FFT}). Stosowano następujące liczby próbek: $n_{FFT} = 256$, 128, 64. Najlepsze wyniki (rys. 7) uzyskano, gdy $n_{FFT} = 256$ próbek, jednakże czas obliczeń był znacznie dłuższy niż w przypadku zastosowania metody TDE lub metody TDEB, gdy $n_{FFT} = 128$ próbek (rys.8).



Rys. 7. Nałożenie uśrednianych przebiegów czasowych prędkości drgań poprzecznych wału zębnika - położenie impulsu synchronizującego było korygowane metodą TDEB, n_{FFT} = 256 a) fragment sygnału od 15+75 próbki, b) fragment sygnału od i 405+465 próbki

Fig. 7. Superposition designed to averaged pinion shaft transversal vibration velocity signals - position synchronizing impulse was corrected by method TDEB, n_{FFT} = 256 a) fragment of signal: samples 15÷75, b) fragment of signal: samples 405÷465



Rys. 8. Nałożenie uśrednianych przebiegów czasowych prędkości drgań poprzecznych wału zębnika
położenie impulsu synchronizującego było korygowane metodą TDEB, n_{FFT} = 128
a) fragment sygnału od 15÷75 próbki, b) fragment sygnału od i 405÷465 próbki

Fig. 8. Superposition designed to averaged pinion shaft transversal vibration velocity signals - position synchronizing impulse was corrected by method TDEB, n_{FFT} = 128 a) fragment of signal: samples 15+75, b) fragment of signal: samples 405+465

Najlepsze wyniki (rys. 9) uzyskano, gdy zastosowano metodę wykorzystującą korelację wzajemną sygnałów (TDER).



- Rys. 9. Nałożenie uśrednianych przebiegów czasowych prędkości drgań poprzecznych wału zębnika - położenie impulsu synchronizującego było korygowane metodą TDER, a) fragment sygnału od 15÷75 próbki, b) fragment sygnału od 405÷465 próbki
- Fig. 9. Superposition designed to averaged pinion shaft transversal vibration velocity signals - position synchronizing impulse was corrected by method TDER, a) fragment of signal: samples 15÷75, b) fragment of signal: samples 405+465

Na rysunku 10 przedstawiono wartości przesunięć oraz spowodowane nimi zmiany współczynnika korelacji uśrednianego rekordu w stosunku do rekordu odniesienia, przed i po zastosowaniu korekty położenia impulsu synchronizującego. Wartość przesunięcia czasowego estymowano w tym przypadku metodą TDER. Zastosowanie korekcji pozwoliło na uzyskanie znacznie wyższych wartości współczynnika korelacji pomiędzy uśrednianymi rekordami.



- Rys. 10. a) Współczynnik korelacji pomiędzy uśrednianymi rekordami przed i po zastosowaniu korekty położenia impulsu synchronizującego, b) wartość przesunięcia impulsu synchronizującego
- Fig. 10. a) Correlation coefficient between averaged records before and after application corrected position synchronizing impulse, b) synchronizing impulse delay (in samples)

Na rysunku 11 przedstawiono uśredniony okresem obrotu zębnika sygnał prędkości drgań jego wału uzyskany z zastosowaniem metody TDER. Strzałką zaznaczono lokalne



maksimum pochodzące od uszkodzonego zęba zębnika oraz przedziały czasu, w których przykładowo przedstawiano nałożone przebiegi czasowe, przed uśrednianiem rys. 5÷9.

- Rys. 11. Uśredniony okresem obrotu przebieg prędkości drgań poprzecznych wału zębnika położenie impulsu synchronizującego było korygowane metodą TDER, wykruszenie zęba zębnika 3 mm, co odpowiada $\epsilon_{\alpha} = 0.96$
- Fig. 11. Pinion shaft transversal vibration velocity signal averaged by pinion revolution period - position synchronizing impulse was corrected by method TDER, pinion chipping 3 mm, what answers face contact ratio: $\epsilon_{\alpha} = 0.96$

Kolejny rysunek (12) przedstawia uśredniony okresem obrotu przebieg prędkości drgań poprzecznych wału zębnika, gdy położenie impulsu synchronizującego nie było korygowane. W stosunku do sygnału przedstawionego na rysunku 11 widoczne jest zmniejszenie się amplitudy sygnału.



- Rys. 12. Uśredniony okresem obrotu przebieg prędkości drgań poprzecznych wału zębnika położenie impulsu synchronizującego nie było korygowane, wykruszenie zęba zębnika 3 mm, co odpowiada $\epsilon_{\alpha} = 0.96$
- Rys. 12. Pinion shaft transversal vibration velocity signal averaged by pinion revolution period - position synchronizing impulse was not corrected, pinion chipping 3 mm, what answers face contact ratio: $\epsilon_{\alpha} = 0.96$

Również w widmach tych sygnałów przedstawionych na rysunku 13 widoczne są różnice w wartościach amplitud składowych rosnące wraz ze wzrostem częstotliwości.



Rys. 13. Widmo sygnału uśrednionego przed i po zastosowaniu korekty położenia impulsu synchronizującego

Fig. 13. Spectrum of averaged signal before and after application corrected position synchronizing impulse

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

• W przypadku uśredniania sygnału drganiowego w diagnozowaniu przekładni zębatych w celu uniknięcia strat informacji diagnostycznych w uśrednionym sygnale celowe jest stosowanie korekcji położenia impulsu synchronizującego.

• Do wyznaczania korekty położenia impulsu synchronizującego w przypadku sygnału prędkości drgań wałów przekładni zębatej najlepsze okazały się metody estymacji opóźnienia czasowego bazujące na korelacji wzajemnej (TDER) i na bispektrum (TDEB), gdy n_{FFT} wynosiła 256 próbek. Metoda TDER okazała się wygodniejsza w zastosowaniu, ponieważ wymagała krótszego czasu obliczeń.

• Wydaje się celowe wykorzystanie tej metody do uśredniania przebiegów czasowych w przypadku diagnozowania innych elementów przekładni zębatej.

Literatura

- 1. Adamczyk J., Krzyworzeka P., Łopacz H.: Systemy synchronicznego przetwarzania sygnałów diagnostycznych. Collegium Columbinum, Kraków 1999.
- 2. Dąbrowski Z., Radkowski S., Wilk A.: Dynamika przekładni zębatych. Warszawa-Katowice-Radom 2000.
- 3. Krzyworzeka P.: Synchroniczne wspomaganie odwzorowań diagnostycznych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2001.
- 4. Krzyworzeka P.: Synchronizm niezamierzony w maszynach. Diagnostyka, Vol. 28, 2003, s. 37+46.
- 5. Łazarz B., Wojnar G.: Detection of early stages of pinion tooth chipping in transmission gear. Machine Dynamics Problems 2003, Vol. 27.
- Lazarz B., Wojnar G.: Modelowanie przekładni zębatych w układzie napędowym do celów diagnostycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – Transport z. 44, Gliwice 2002, s.127÷134.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

Abstract

The paper presents application of different methods of time delay estimation to correct position-synchronizing impulse in vibration signal averaging. The time delay estimation was based on cross-cumulant (TDE), cross-correlation (TDER) and bispectrum (TDEB). To correct position-synchronizing impulse TDER and TDEB proved to be the best. Calculation time in case of TDER was shorter.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych latach 2003-2006 jako projekt badawczy 5T07B02425.