

ANALIZA UŻYTECZNOŚCI DO CELÓW DIAGNOSTYCZNYCH RÓŻNYCH SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH GENEROWANYCH PRZEZ PRZEKŁADNIĘ ZĘBATĄ

Grzegorz WOJNAR*

* Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych, Wydział Transportu, Politechnika Śląska, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

Grzegorz.Wojnar@polsl.pl

Streszczenie: Ze względu na powszechne wykorzystanie przekładni zębatych w układach przeniesienia napędu wiele ośrodków naukowych na całym świecie zajmuje się doskonaleniem metod analizy sygnałów drganiowych wykorzystywanych w procesie diagnozowania tych obiektów. Równie ważnym aspektem jest wyselekcjonowanie takiego sygnału drganiowego, który będzie niósł możliwie najwięcej informacji o zachodzącym procesie degradacyjnym. Z tego powodu w niniejszym opracowaniu dokonano porównania użyteczności niektórych sygnałów drganiowych generowanych przez przekładnię zębatą do wykrywania uszkodzeń jej łożysk i kół zębatych. Sformułowano również zalecenia dotyczące wykorzystania pewnych sygnałów do wykrywania uszkodzeń odpowiednich elementów przekładni.

1. WPROWADZENIE

W ostatnim okresie czasu pojawiło się wiele publikacji dotyczących wykrywania uszkodzeń elementów przekładni zębatych na podstawie analizy sygnałów drganiowych (Dybała i inni, 2006; Łazarz, 2001; Łazarz i inni, 2006, 2007; Oehlmann i inni, 1997). Do tego celu wykorzystywane są między innymi sygnały przyspieszeń drgań obudowy przekładni lub prędkości drgań poprzecznych wirujących wałów (Łazarz i inni, 2006, 2007).

Ze względu na występowanie zjawisk nieliniowych (Batko i inni, 2008) wywołanych m.in. luzami, nieliniowościami charakterystyk elementów sprężystych rejestrowane do celów diagnostycznych sygnały są z reguły niestacjonarne. Charakterystyki częstotliwościowe mierzonych sygnałów w istotny sposób zależą od transmitancji sygnałów składowych od źródeł do punktu pomiaru. Sygnał mierzony jest zazwyczaj splotem i superpozycją wielu sygnałów składowych i szumów (Madej i inni, 2008). Z tych powodów pomimo dynamicznego rozwoju cyfrowych metod akwizycji i przetwarzania sygnałów drganiowych w procesie diagnozowania nadal istotne jest zarejestrowanie takiego sygnału drganiowego, który będzie niósł możliwie najwięcej informacji o zachodzącym w maszynie procesie degradacyjnym. Oprócz samego punktu pomiarowego często istotny jest również kierunek, w którym jest rejestrowany sygnał drganiowy, dlatego dobry diagnosta lub zespół diagnostyczny musi posiadać obszerną wiedzę zarówno o realizowanych w maszynie procesach roboczych, jak i wiedzę z zakresu rejestracji, przetwarzania i analizy sygnałów drganiowych.

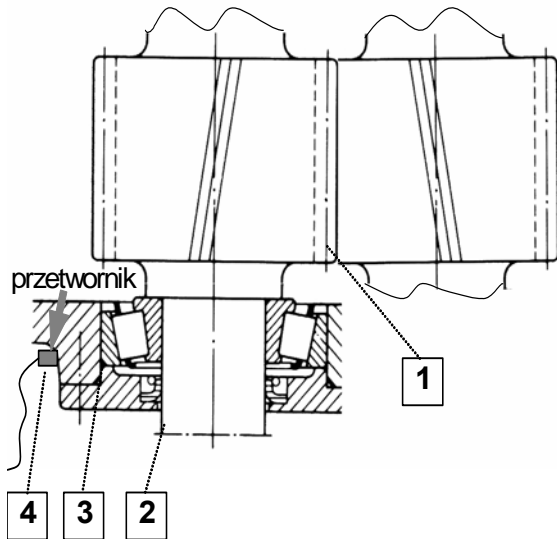
2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na podstawie wyników badań doświadczalnych przedstawionych m.in. przez Łazarza i innych (2007) można stwierdzić, iż do wykrywania uszkodzeń takich elementów przekładni zębatych jak koła zębate czy łożyska oprócz sygnału przyspieszeń drgań obudowy przekładni doskonale nadaje się mierzony wibrometrem laserowym sygnał prędkości drgań poprzecznych wałów przekładni. Efekty powodowane przez niewielkie lokalne uszkodzenie bieżni zewnętrznej są łatwiejsze do zaobserwowania w zmierzonym sygnale prędkości drgań poprzecznych wału w porównaniu do sygnału przyspieszeń drgań obudowy przekładni, ponieważ w przypadku rejestracji drgań poprzecznych wału droga sygnału generowanego przez uszkodzenie łożyska ulega skróceniu. Zostaje również wyeliminowany wpływ złożonej transmitancji układu łożysko-korpus przekładni (rysunek 1).

Przy wykorzystaniu zidentyfikowanego modelu dynamicznego przekładni zębatej (Łazarz, 2001) przeprowadzono symulacje pracy przekładni z pojedynczym lokalnym uszkodzeniem bieżni łożyska i odchyłkami wykonania kół zębatych. Porównując sygnały prędkości drgań poprzecznych wału koła z prędkościami drgań kątowych tegoż wału można stwierdzić, że znacznie łatwiejsze jest wnioskowanie o wystąpieniu uszkodzenia bieżni łożyska na pod stawie pierwszego z wymienionych sygnałów (rysunek 2a). Z kolei w drugim z sygnałów znacznie lepiej są widoczne wejścia w przypór kolejnych par zębów (rysunek 2b).

W pracy Łazarza i innych (2007) porównywano zmiany wartości miar diagnostycznych użytecznych do wykrywania wykruszenia wierzchołka zęba zębniaka. Zauważono tam, że także w przypadku lokalnego uszkodzenia koła zębatego ze względu na wymienione wcześniej zalety bar-

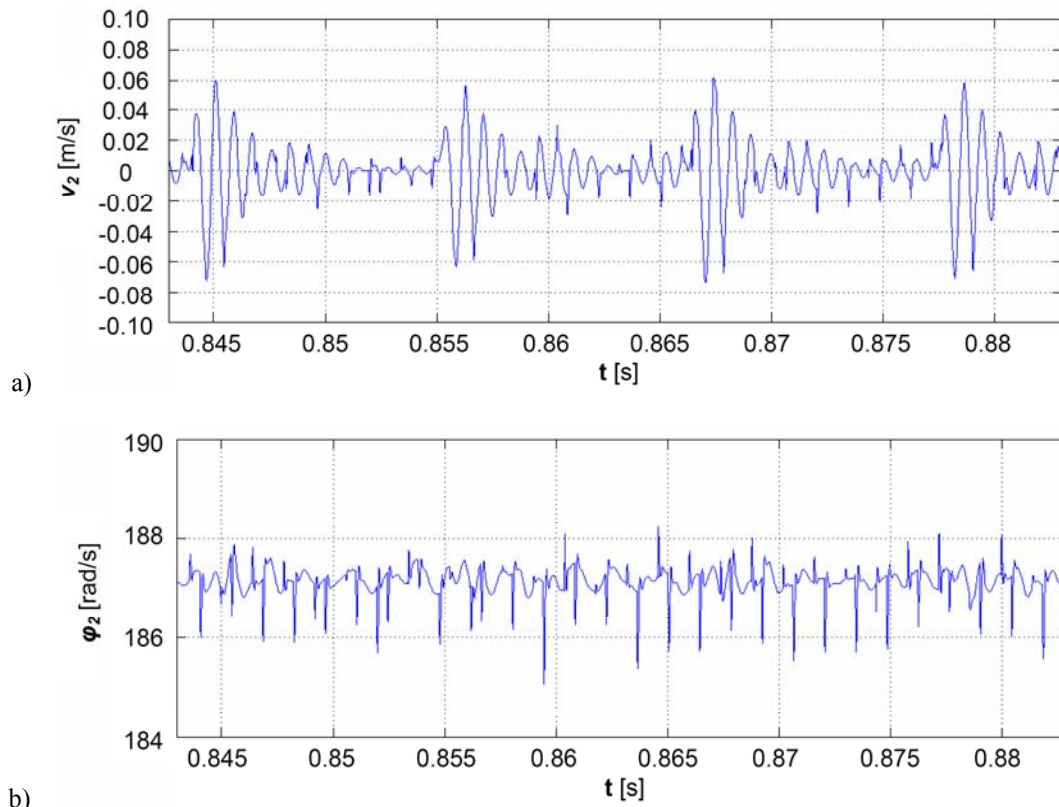
dziej użyteczny do diagnozowania jest sygnał prędkości drgań poprzecznych wału przekładni niż sygnał przyspieszeń drgań jej obudowy. Porównano także sygnały prędkości drgań poprzecznych wałów przekładni zarejestrowane w różnych kierunkach i zauważono, że najbardziej użyteczny do diagnozowania lokalnych uszkodzeń kół zębatych jest sygnał zarejestrowany w kierunku działania siły międzyzębnej.



Rys. 1. Przekrój przekładni zębatej: 1 – strefa zazębienia, 2 – wał, 3 – miejsce powstawania drgań obudowy, 4 – miejsce pomiaru drgań przetwornikiem przyspieszeń (Oehlmann i inni, 1997)

W przypadku diagnozowania uszkodzeń kół zębatych na podstawie sygnałów przyspieszeń drgań obudowy przekładni lub sygnałów prędkości drgań poprzecznych wałów przekładni w pewnych warunkach dosyć trudne jest diagnozowanie uszkodzeń kół w przypadku jednoczesnego występowania uszkodzeń łożyskowania przekładni (Łazarz i inni, 2006).

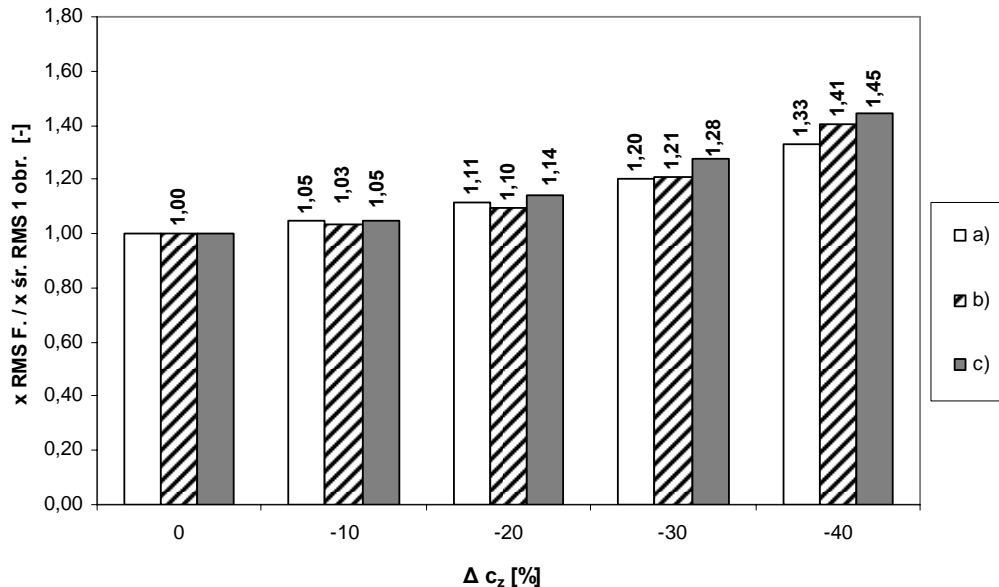
Ze względu na to, iż w sygnale prędkości drgań kątowych wału koła (rysunek 2) pomimo występowania uszkodzenia łożyska tocznego znacznie lepiej są widoczne wejścia w przypór kolejnych zębów niż w sygnale prędkości drgań poprzecznych, przeprowadzono badania symulacyjne zorientowane na sprawdzenie użyteczności sygnału prędkości drgań kątowych wału do diagnozowania pęknięcia podstawy zęba. Obiektem badań była przekładnia o parametrach: liczba zębów zębnika $z_1=16$, liczba zębów koła $z_2=24$, szerokość kół $b=20\text{mm}$, moduł normalny $m_n=4,5\text{mm}$, współczynnik przesunięcia zarysu zębnika $x_1=0,864$, współczynnik przesunięcia zarysu koła $x_2=-0,5$, odległość osi $a_o=91,5\text{mm}$, czołowa liczba przyproru $\varepsilon_\alpha=1,32$. Prędkość obrotowa wału zębnika wynosiła 2700 obr/min, wskaźnik obciążenia jednostkowego przekładni wynosił $Q=4\text{MPa}$. Symulowano pęknięcie podstawy zęba koła nr 4 poprzez zmniejszenie sztywności zazębienia. W celu łatwiejszej interpretacji zachodzących zjawisk obiektem badań była przekładnia o zębach prostych z zerowymi odchyłkami wykonania kół. W trakcie pracy zęba nr 3 na odcinku przyproru w zazębienie wchodził uszkodzony ząb zębnika nr 4.



Rys. 2. Sygnał prędkości drgań wału koła w przypadku wystąpienia w jednym z łożysk lokalnego uszkodzenia bieźni zewnętrznej: a) zmiany prędkości drgań poprzecznych, b) zmiany prędkości drgań kątowych

Ze względu na to, że jest on mniej sztywny od pozostałych, wchodzi on w przypór łagodniej niż pozostałe zęby zębniaka. Powoduje to, że np. wartość skuteczna fragmentu sygnału wibroakustycznego prędkości drgań wału przekładni, odpowiadającego pracy zęba nr 3 na odcinku przyporu jest mniejsza niż innych nieuszkodzonych zębów. W trakcie pracy zęba nr 4 wchodzi w przypór zęb nr 5. Ze względu na większe ugięcie zęba nr 4 spowodowane osłabieniem jego podstawy zęb zębniaka nr 5 wchodzi w przy-

pór z pewnym uderzeniem, które powoduje wzrost wartości skutecznej fragmentu sygnału prędkości drgań wału przekładni odpowiadającego pracy zęba nr 4 na odcinku przyporu. Wejście w przypór z pewnym uderzeniem zęba zębniaka nr 5 powoduje także pewien wzrost wartości skutecznej sygnału WA już po wyjściu z przyporu zęba nr 4. Jest to oczywiście uzależnione od prędkości obrotowej wałów przekładni, czołowej liczby zębów i innych parametrów.



Rys. 3. Stosunek wartości skutecznej fragmentu sygnału odpowiadającego pracy pękniętego i kolejnego zęba zębniaka do średniej wartości skutecznej fragmentu sygnału odpowiadającego jednemu obrotowi diagnozowanego koła zębatego obliczany na podstawie sygnału: a) prędkości drgań poprzecznych wału koła, b) prędkości drgań poprzecznych wału zębniaka, c) prędkości drgań kątowych wału koła

Z powyższych powodów w celu porównania użyteczności analizowanych sygnałów WA przyjęto względnie prosty obliczeniowo stosunek wartości skutecznej fragmentu sygnału odpowiadającego pracy pękniętego i kolejnego zęba zębniaka do średniej wartości skutecznej fragmentu sygnału odpowiadającego jednemu obrotowi diagnozowanego koła zębatego. W celu łatwiejszej interpretacji uzyskane wyniki odniesiono do wartości uzyskanych dla przekładni bez uszkodzeń i przedstawiono na rysunku 3. Przy tym samej wartości zmniejszenia sztywności zazębienia odpowiadającego symulowanemu pęknięciu podstawy zęba zaproponowana do miara osiąga najwyższe wartości w przypadku, gdy jest obliczana na podstawie sygnału prędkości drgań kątowych wału koła (rysunek 3c). Uzyskane wyniki świadczą o tym, iż sygnał ten może nieść, co najmniej tyle samo informacji o uszkodzeniu koła zębatego, co sygnał prędkości drgań poprzecznych wału. Ponadto obserwując rysunek 2 można zauważyć, że sygnał prędkości drgań poprzecznych wału jest stosunkowo wrażliwy na lokalne uszkodzenia bieżni łożysk w przeciwieństwie do sygnału prędkości drgań kątowych wału.

Jeżeli zaproponowana miara wykazuje wrażliwość na zmiany analizowanych sygnałów, spowodowane symulowanym uszkodzeniem zęba koła (rysunek 3), to diagnozowanie z wykorzystaniem bardziej zaawansowanych metod przetwarzania sygnału będzie jeszcze bardziej efektywne.

3. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można stwierdzić, że:

- W przypadku diagnozowania przekładni zębatych zorientowanego na wykrywanie uszkodzeń łożysk przekładni zaleca się pomiar i analizę sygnału prędkości drgań poprzecznych jej wałów.
- W przypadku diagnozowania przekładni zębatych zorientowanego na wykrywanie uszkodzeń kół zębatych przekładni zaleca się pomiar i analizę sygnału prędkości drgań kątowych wspartą pomiarem i analizą sygnału prędkości drgań poprzecznych jej wałów.
- Wykorzystanie sygnałów prędkości drgań poprzecznych i kątowych wałów przekładni w połączeniu z wrażliwymi wskaźnikami diagnostycznymi może stworzyć możliwość stosunkowo łatwego wykrywania uszkodzeń kół zębatych w obecności uszkodzeń łożyskowania.
- Wnioski płynące z niniejszych analiz powinny zostać zweryfikowane na podstawie wyników badań doświadczalnych, które w najbliższym czasie będą prowadzone przez autora niniejszego opracowania.

LITERATURA

1. **Batko W., Dąbrowski Z., Kiciński J.** (2008), *Nonlinear effects in technical diagnostics*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, Radom.
2. **Dybała J., Mączak J., Radkowski St.** (2006), *Wykorzystanie sygnału wibroakustycznego w analizie ryzyka technicznego*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Warszawa-Radom.
3. **Łazarz B.** (2001), *Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej jako podstawa projektowania*, Monograficzna seria wydawnicza Biblioteka Problemów Eksploatacji – Studia i Rozprawy, Katowice-Radom.
4. **Łazarz B., Madej H., Wilk A., Figlus T., Wojnar G.** (2006), *Diagnozowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych*, Monograficzna seria wydawnicza Biblioteka Problemów Eksploatacji, Katowice-Radom.
5. **Łazarz B., Wojnar G., Czech P.** (2007), *Wibrometria laserowa i modelowanie – narzędzia współczesnej diagnostyki przekładni zębatych*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Katowice-Radom.
6. **Madej H., Łazarz B., Wojnar G.** (2008), Zastosowanie analizy falkowej w diagnozowaniu uszkodzeń układu wymiany ładunku silnika spalinowego, *ZI. WIBROTECH 2008*, Kraków.
7. **Oehlmann H., Brie D., Tomczak M., Richard A.** (1997), A Method for Analysing Gearbox Faults Using Time-Frequency Representations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11 (4).

ANALYSIS OF USEFULNESS OF DIFFERENT VIBRATIONS SIGNALS FOR TOOTHED GEAR DIAGNOSTICS

Abstract: Since toothed gears are universally used in drive transmission systems, lots of scientific research centers around the world try to perfect methods of vibration analysis (vibration signals are used to diagnose these drive elements). Another equally important issue is how to select an appropriate vibration signal carrying highest possible amount of information on advancing degradation process. For this reason the current work deals with comparison of usefulness of some vibration signals generated by toothed gear in bearings and gear wheels fault detection. Recommendations how to use some signals in gear elements fault detection are set in the paper as well.