

Grzegorz WOJNAR

## SELEKCJA SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH PRZEKŁADNI ZĘBATYCH UKIERUNKOWANA NA DIAGNOSTYKĘ

**Streszczenie.** W niniejszym opracowaniu dokonano porównania użyteczności niektórych sygnałów drganiowych generowanych przez przekładnię zębatą do wykrywania uszkodzeń jej łożysk i kół zębatych. Analizy przeprowadzono przy wykorzystaniu stosunkowo prostego obliczeniowo wskaźnika diagnostycznego, jakim jest wartość skuteczna obliczana na podstawie zarejestrowanego sygnału drganiowego w odpowiednio wyselekcjonowanych interwałach czasowych, ściśle związanych z zachodzącymi w przekładni zjawiskami dynamicznymi. Sformułowano również zalecenia dotyczące wykorzystania pewnych sygnałów do wykrywania uszkodzeń odpowiednich elementów przekładni.

## SELECTION OF TOOTHED GEAR VIBRATIONS SIGNALS FOR DIAGNOSTICS

**Summary.** The paper presents comparisons of usefulness of some vibrations signals generated through toothed gear to toothed wheel and rolling bearings fault detection. Based on the investigation useful vibrations signals in diagnostics local damage of different gear elements was proposed.

### 1. WPROWADZENIE

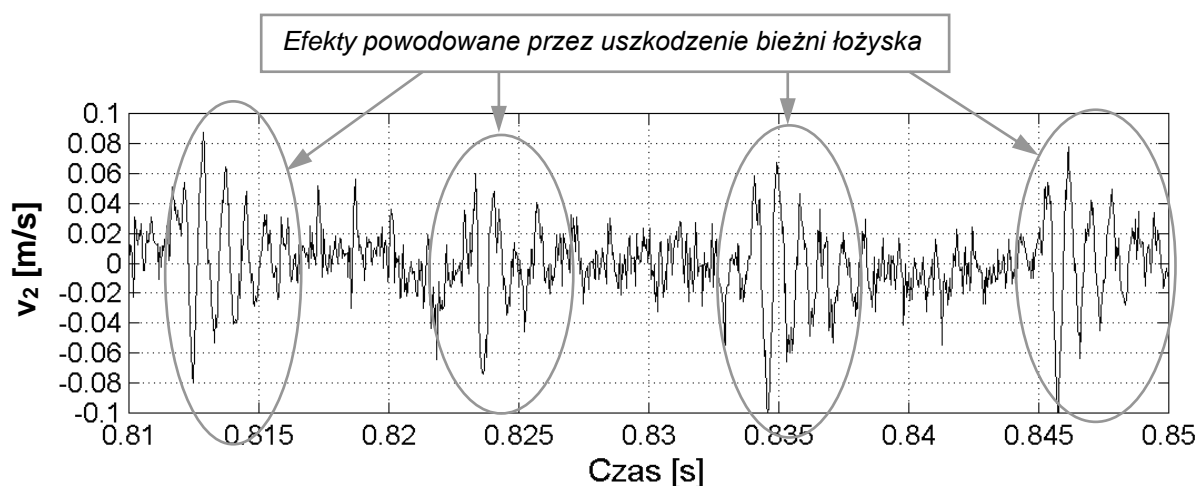
W ostatnich latach pojawiło się wiele publikacji dotyczących wykrywania uszkodzeń elementów przekładni zębatych na podstawie analizy sygnałów drganiowych [1, 2, 3, 5, 6, 8]. Do tego celu wykorzystywane są między innymi sygnały przyspieszeń drgań obudowy przekładni lub prędkości drgań poprzecznych wirujących wałów.

Ze względu na występowanie zjawisk nieliniowych 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 [7]. 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. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na podstawie wyników badań doświadczalnych przedstawionych m.in. w [8] 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. Na rysunku 1 przedstawiono sygnał prędkości drgań poprzecznych wału koła łożyskowanego na łożyskach kulkowych zwykłych 6307. Jedno z łożysk posiadało lokalne uszkodzenie bieżni zewnętrznej, symulujące jamkę pittingową o niewielkiej głębokości. Długość uszkodzonego fragmentu bieżni wynosiła 2 [mm]. Wykonane uszkodzenie bieżni zewnętrznej podczas pracy przekładni i przetaczania się kulki przez uszkodzony fragment bieżni spowodowało chwilowy, powtarzający się cyklicznie, wzrost prędkości drgań poprzecznych wału (rys.1). Efekty powodowane przez to niewielkie uszkodzenie są tak łatwe 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.

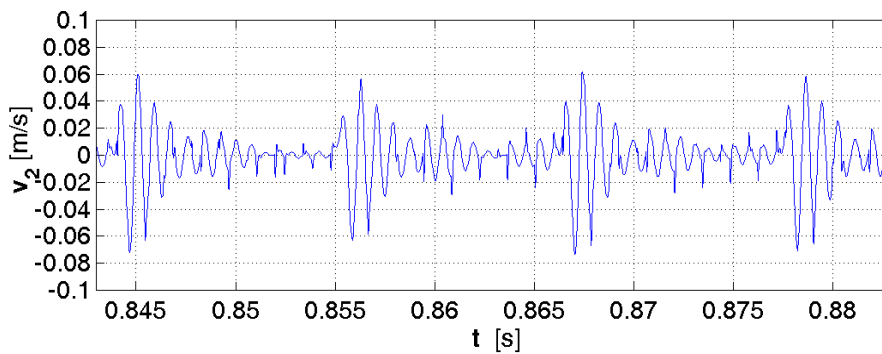


Rys. 1. Przebieg prędkości drgań poprzecznych wału przekładni w przypadku lokalnego uszkodzenia bieżni łożyska

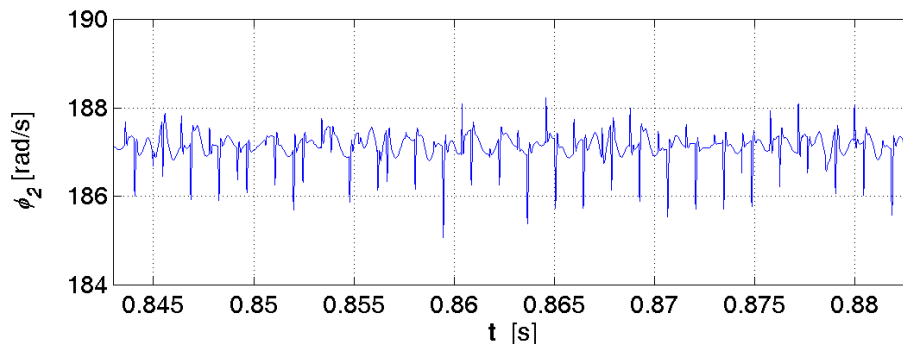
Fig. 1. Transverse vibrations velocity of rotation gear shaft recorded for case of local damage of rolling bearing outer race

Przy wykorzystaniu modelu dynamicznego przekładni zębatej [4] przeprowadzono symulacje pracy przekładni z wyżej wymienionym uszkodzeniem łożyska i odchyłkami wykonania kół zębatych. Porównując sygnały prędkości drgań poprzecznych wału koła z prędkościami i drgań kątowych tegoż wału można stwierdzić, że znacznie łatwiejsze jest wnioskowanie o wystąpieniu uszkodzenia bieżni łożyska na podstawie pierwszego z wymienionych sygnałów. Z kolei w drugim z sygnałów znacznie lepiej są widoczne wejścia w przypór kolejnych par zębów.

a)



b)



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

Fig. 2. Velocity signal of rotation gear shaft for case of local damage of rolling bearing outer race: a) change of gear shaft transverse vibrations velocity, b) change of gear shaft angular vibrations velocity

W pracach [6, 8] 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 bardziej 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.

W przypadku diagnozowania uszkodzeń kół zębatych na podstawie sygnałów przyspieszeń drgań obudowy przekładni lub sygnałów prędkości drgań poprzecznych wałów przekładni istotne jest to, iż sygnały te zawierają informacje zarówno o stanie łożyskowania, jak i o stanie kół zębatych. W pewnych warunkach dosyć trudne jest diagnozowanie uszkodzeń kół w przypadku jednoczesnego występowania uszkodzeń łożyskowania przekładni. Konieczne staje się wtedy stosowanie bardzo zaawansowanych, cyfrowych metod przetwarzania sygnałów drganiowych bazujących m.in. na odpowiedniej filtracji grzebieniowej [3, 5].

Ze względu na to, iż w sygnale prędkości drgań kątowych wału koła (rys. 2) pomimo występowania uszkodzenia łożyska tocznego znacznie lepiej były 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 zębniaka  $z_1=16$ , liczba zębów koła  $z_2=24$ , szerokość kół  $b=20$  [mm], moduł normalny  $m_n 4,5$  [mm], współczynnik przesunięcia zarysu zębniaka

$x_1=0,864$ , współczynnik przesunięcia zarysu koła  $x_2=0,5$ , odległość osi  $a_o$  91,5 [mm], czołowa liczba przyporu  $\varepsilon_\alpha=1,32$ . Prędkość obrotowa wału zębniaka wynosiła 2700 [obr/min], wskaźnik obciążenia jednostkowego przekładni wynosił  $Q=4$  [MPa]. Symulowano pęknięcie podstawy zęba 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 przyporu w zazębienie wchodzi uszkodzony ząb zębniaka nr 4. Ze względu na to, że jest on mniej sztywny od pozostałych, wchodzi on w przypór łagodniej niż pozostałe zęby zębniaka. Powoduje to, że wartość skuteczna fragmentu sygnału wibroakustycznego prędkości drgań wału przekładni, odpowiadającego pracy zęba nr 3 na odcinku przyporu (rys. 3), jest mniejsza niż innych nieuszkodzonych zębów. W trakcie pracy zęba nr 4 wchodzi w przypór ząb nr 5. Ze względu na większe ugięcie zęba nr 4 spowodowane osłabieniem jego podstawy ząb zębniaka nr 5 wchodzi w przypór z pewnym uderzeniem, które powoduje wzrost wartości skutecznej fragmentu sygnału wibroakustycznego 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.

Do porównania użyteczności analizowanych sygnałów WA wybrano stosunkowo najprostszą obliczeniowo miarę, jaką jest wartość skuteczna, ale określana dla wyselekcjonowanych fragmentów sygnału. Ze względu na to, iż pęknięcie zęba, jak wykazano powyżej, może powodować wzrost wartości skutecznej sygnału WA zarejestrowanego podczas pracy dwóch kolejnych zębów, jako miarę wrażliwości analizowanych sygnału na symulowane pęknięcie podstawy zęba zębniaka przyjęto wartość skuteczną prędkości drgań obliczaną dla dwóch kolejnych odcinków przyporu.

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



Rys. 3. Wartości skuteczne sygnału prędkości drgań poprzecznych wału koła obliczane dla fragmentu sygnału odpowiadającego pracy dwóch kolejnych par zębów - zmniejszenie sztywności zazębienia w przypadku pracy pękniętego zęba  $\Delta c_z=-30\%$

Fig. 3. Root mean square calculated for fragment of gear shaft transverse vibrations velocity related with contact ratio two next teeth - crack of root tooth  $\Delta c_z=-30\%$

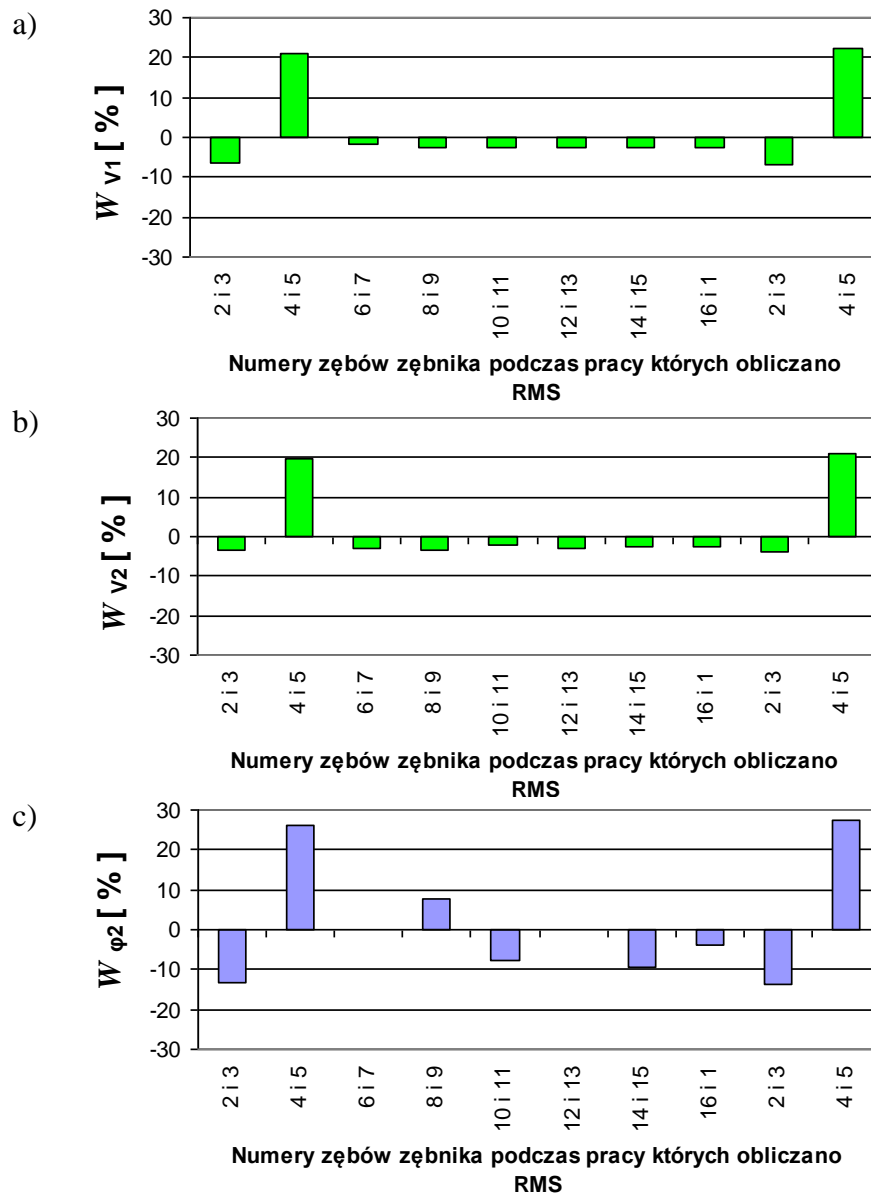
W celu łatwiejszej obserwacji zmian analizowanej miary na rysunku 4 przedstawiono je procentowo wykorzystując wskaźnik  $W$  obliczany z zależności:

$$W = 100 \cdot \frac{x_{RMS F.} - x_{\acute{s}r.RMS 1obr.}}{x_{\acute{s}r.RMS 1obr.}} [\%], \quad (1)$$

gdzie:

$x_{RMS F.}$  - wartość skuteczna fragmentu sygnału odpowiadającego pracy dwóch kolejnych zębów,

$x_{\acute{s}r.RMS 1obr.}$  - średnia wartości skutecznej fragmentu sygnału odpowiadającego jednemu obrotowi diagnozowanego koła zębatego.

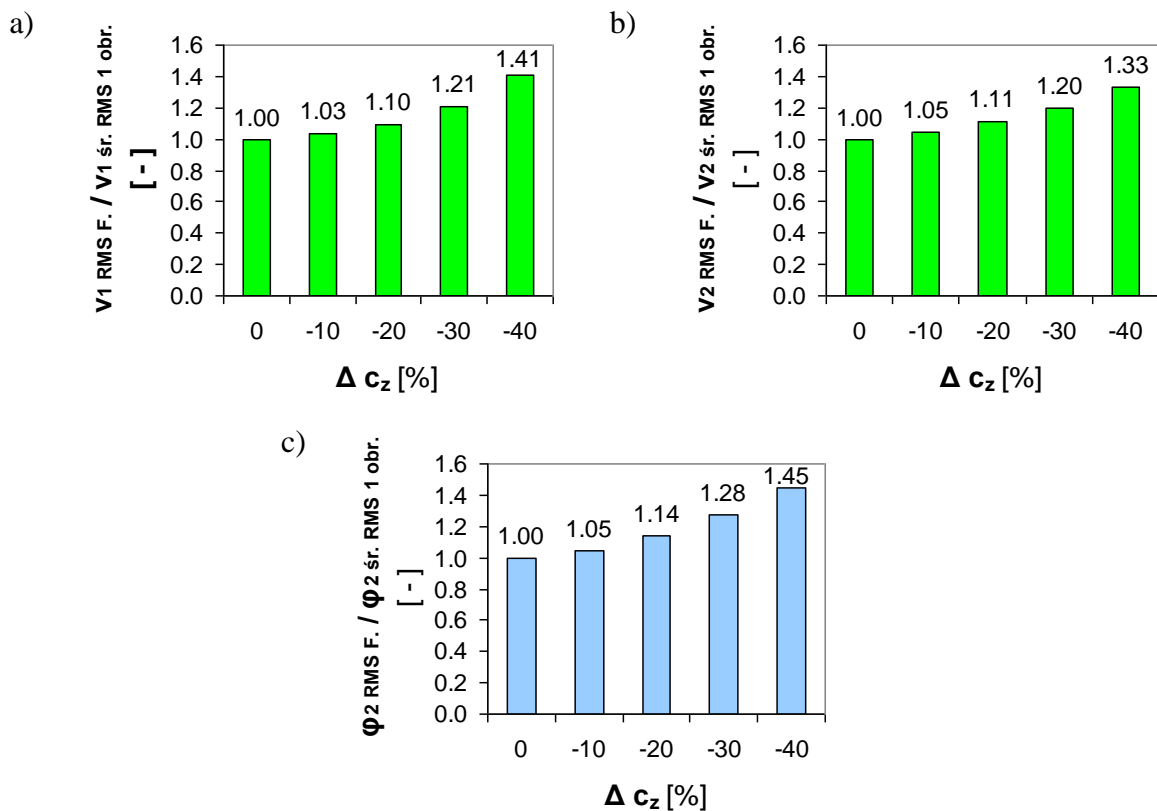


Rys. 4. Wartości wskaźnika  $W$  obliczane na podstawie sygnału: a) prędkości drgań poprzecznych wału zębnika, b) prędkości drgań poprzecznych wału koła c) prędkości drgań poprzecznych wału koła -  $\Delta c_z = -30\%$

Fig. 4. Value of indicator  $W$  calculate on the base: a) pinion shaft transverse vibrations velocity, b) gear shaft transverse vibrations velocity c) gear shaft angular vibrations velocity;  $\Delta c_z = -30\%$

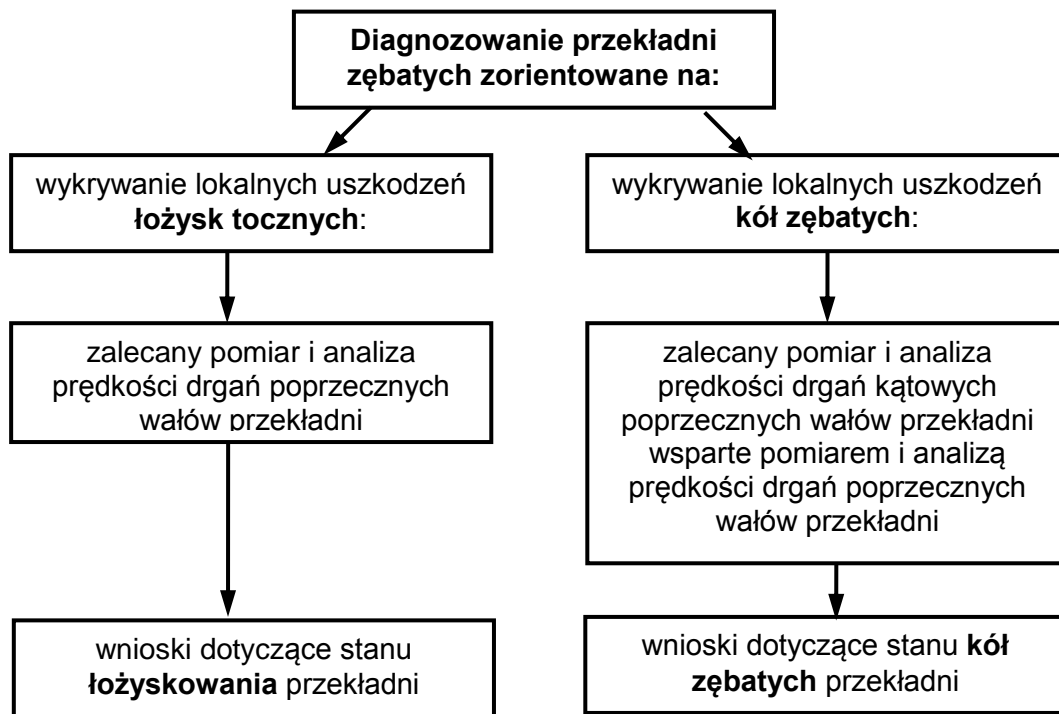
Na rysunku 5 przedstawiono stosunek wartości skutecznej fragmentu sygnału odpowiadającego pracy pękniętego i kolejnego zęba zębnika do średniej wartości skutecznej

fragmentu sygnału odpowiadającego jednemu obrotowi diagnozowanego koła zębatego. Można zauważyć, że przy tym samej wartości zmniejszenia sztywności zazębienia odpowiadającego symulowanemu pęknięciu podstawy zęba osiąga on najwyższe wartości w przypadku, gdy jest obliczany na podstawie sygnału prędkości drgań kątowych wału koła (rys. 5c). 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. Wykorzystanie obu sygnałów drganiowych w połączeniu z wrażliwymi wskaźnikami diagnostycznymi może stworzyć możliwość stosunkowo łatwego wykrywania uszkodzeń kół zębatych w obecności uszkodzeń łożysk (rys. 6).



Rys. 5. Stosunek wartości skutecznej fragmentu sygnału odpowiadającego pracy pękniętego i kolejnego zęba zębnika do średniej wartości skutecznej fragmentu sygnału odpowiadającego jednemu obrotowi diagnozowanego koła zębatego obliczany na podstawie sygnału: a) prędkości drgań poprzecznych wału zębnika, b) prędkości drgań poprzecznych wału koła c) prędkości drgań poprzecznych wału koła

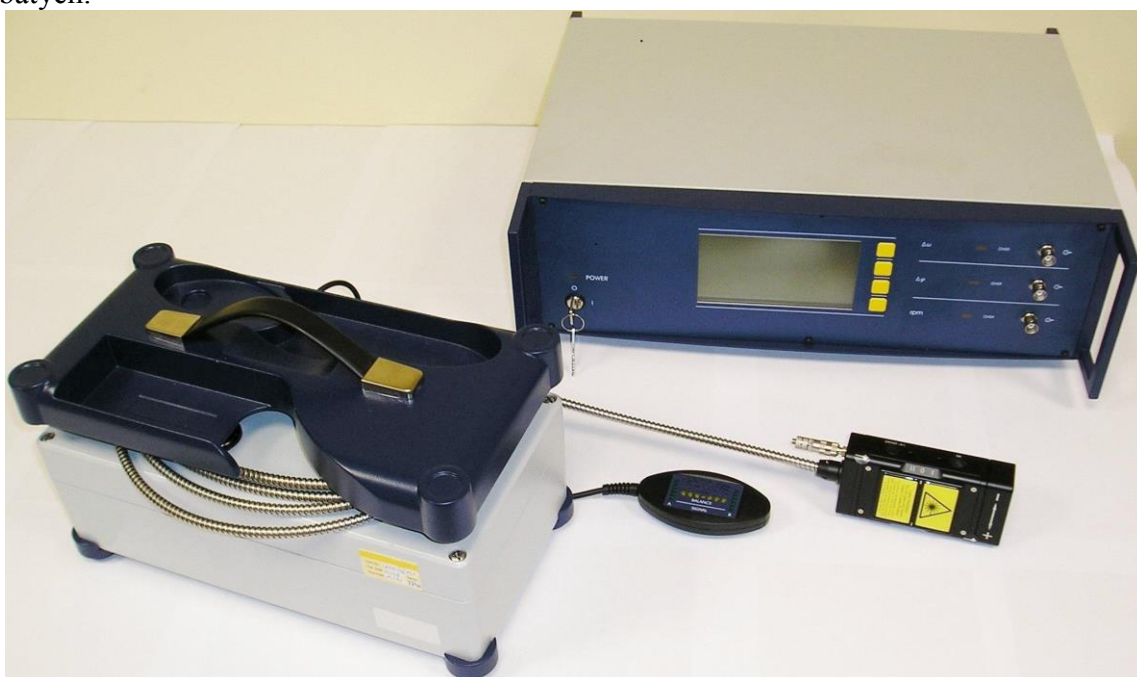
Fig. 5. Ratio root mean square of fragment vibrations signal related with contact ratio two next teeth to root mean square of fragment vibrations signal related with one pinion rotation calculated on the base: a) pinion shaft transverse vibrations velocity, b) gear shaft transverse vibrations velocity c) gear shaft angular vibrations velocity



Rys. 6. Proponowany schemat wykrywania uszkodzeń kół zębatych przekładni w obecności uszkodzeń łożysk

Fig. 6. Proposed diagram of fault tooted wheel, bearings diagnostics and fault diagnostics tooted wheel in the case of damaged bearings

Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że zmiany prędkości drgań kątowych wałów przekładni mogą być z powodzeniem wykorzystane do diagnozowania lokalnych uszkodzeń kół zębatych. Pojawienie się na rynku laserowych wibrometrów (rys. 7) służących do pomiaru tych sygnałów stwarza nowe możliwości w zakresie diagnozowania przekładni zębatych.



Rys. 7. Wibrometr laserowy służący do bezkontaktowego laserowego pomiaru drgań kątowych wałów  
Fig. 7. Laser vibrometer for non-contact acquisition of angular vibrations velocity

### 3. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można stwierdzić, że:

1. Wykorzystanie sygnałów prędkości drgań kątowych mierzonych bezkontaktowo może stworzyć nowe możliwości w zakresie diagnozowania przekładni zębatych pracujących w warunkach stałych i zmiennych w czasie prędkości obrotowych.
2. 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.
3. Wnioski płynące z niniejszych analiz powinny zostać zweryfikowane na podstawie badań symulacyjnych uwzględniających odchyłki wykonania kół zębatych oraz na podstawie wyników badań doświadczalnych, które w najbliższym czasie będą prowadzone przez autora niniejszego opracowania.

### Bibliografia

1. Czech P., Łazarz B., Wojnar G.: Wykrywanie lokalnych uszkodzeń zębów kół przekładni przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych i algorytmów genetycznych. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Katowice-Radom 2007.
2. Dybała J., Mączak J., Radkowski St.: Wykorzystanie sygnału wibroakustycznego w analizie ryzyka technicznego. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Warszawa-Radom 2006.
3. Figlus T.: Metoda drganiowa diagnozowania stanu kół zębatych w przypadkach zużycia i uszkodzeń łożysk tocznych przekładni. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska 2005.
4. Łazarz B.: Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej jako podstawa projektowania. Monograficzna seria wydawnicza Biblioteka Problemów Eksploatacji – Studia i Rozprawy, Katowice-Radom 2001.
5. Łazarz B., Madej H., Wilk A., Figlus T., Wojnar G.: Diagnozowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych. Monograficzna seria wydawnicza Biblioteka Problemów Eksploatacji, Katowice-Radom 2006.
6. Łazarz B., Wojnar G., Czech P.: Wibrometria laserowa i modelowanie - narzędzia współczesnej diagnostyki przekładni zębatych. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Katowice-Radom 2007.
7. Madej H., Łazarz B., Wojnar G.: Zastosowanie analizy falkowej w diagnozowaniu uszkodzeń układu wymiany ładunku silnika spalinowego ZI. XIV Konferencja Naukowa Wibrotechniki i Wibroakustyki, IX Ogólnopolskie Seminarium Wibroakustyka W Systemach Technicznych W-IBROTECH 2008, Kraków 20-21.11.2008.
8. Wojnar G.: Wykrywanie uszkodzeń kół zębatych wybranymi metodami przetwarzania sygnałów drganiowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska 2004.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski