

Bogusław ŁAZARZ, Grzegorz PERUŃ

## MODELOWANIE ZUŻYCIA POWIERZCHNI ROBOCZYCH ZĘBÓW KÓŁ PRZEKŁADNI PRACUJĄCYCH W UKŁADZIE NAPĘDOWYM NA POTRZEBY DIAGNOSTYKI

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych wpływu zużycia powierzchni roboczych zębów na prędkość drgań poprzecznych wału przekładni. Badaniami objęto jedną z występujących w przekładniach zębatych form zużycia – wykruszania, powszechnie nazywaną pittingiem. Badania doświadczalne zrealizowano na stanowisku FZG, natomiast badania symulacyjne z wykorzystaniem modelu dynamicznego tego stanowiska, rozbudowanego o możliwość symulacji zużycia zębów kół.

## THE MODELLING OF TOOTH SURFACE WEAR OF POWER TRANSMISSION SYSTEM ON NEED OF DIAGNOSTICS

**Summary.** The paper presents simulation and laboratory investigation results of gear tooth surface pitting wear influence on shaft transverse vibration velocity. Laboratory investigation was carry out on FZG stand. In simulation investigation dynamic model of FZG stand expanded to gear tooth pitting wear simulation was used.

### 1. WPROWADZENIE

Głównym zadaniem diagnostyki jest wykrycie wad przekładni we wczesnym stadium, zanim doprowadzą one do stanu awaryjnego. Podstawowymi metodami diagnostyki przekładni zębatych są metody drganiowe. W praktyce przemysłowej parametrem stanu jest bardzo często wartość skuteczna prędkości lub przyspieszeń drgań obudowy lub wałów przekładni. W okresie eksploatacji przekładnia powinna być poddawana regularnym badaniom diagnostycznym. Z badań [5, 7] wynika, że błąd profilu, wywołany równomiernym na całym kole zużyciem ciernym zębów, powoduje wzrost składowych widmowych związanych z częstotliwością zazębienia, przy czym jest to często bardziej widoczne w wyższych harmonicznym niż w częstotliwości podstawowej. Zużycie cierne powierzchni roboczych zębów jest na ogół zbliżone dla wszystkich zębów i prowadzi do podwyższenia sił dynamicznych, które po pewnym czasie ustalają się na stałym poziomie pomimo dalszego postępu zużycia [5].

W ramach niniejszej pracy podjęto próbę modelowania zużycia powierzchni zębów kół, co pozwoli wykorzystać model do celów diagnostycznych.

## 2. PROCESY ZUŻYCIA W PRZEKŁADNIACH ZĘBATYCH

Skutkiem procesu użytkowania obiektu jest występowanie jego niesprawności i uszkodzeń. Za uszkodzenie uważa się najczęściej zdarzenie losowe, w wyniku którego dochodzi do czasowej lub stałej niezdatności, natomiast za niesprawność – zdarzenie losowe, w wyniku którego następuje zmiana parametrów eksploatacyjnych bez utraty zdatności do pracy. Z analizy literatury wynika, że przyczynę większości uszkodzeń lub niesprawności stanowią procesy tribologiczne. Z tego powodu uzasadnione jest prognozowanie intensywności tych procesów, co pozwala już na etapie projektowania, przy założeniu dopuszczalnych wartości zużycia, oszacować trwałość urządzenia.

Ze względu na różnorodność form oraz brak jednej ogólnej teorii zużycia, podejmowane są próby opisu jego intensywności w konkretnej klasie węzłów tarcia. Procesy tribologiczne zachodzące w przekładniach zębatych z powodu występowania toczenia z poślizgiem, należą do najbardziej skomplikowanych. Spośród najważniejszych procesów zużycia kół zębatych w przekładniach smarowanych należy wymienić [6]:

- zużycie ściernie,
- zużycie zmęczeniowe powierzchniowe,
- zacieranie,
- fretting,
- fretting – korozję,
- plastyczną makrodeformację – zużycie odkształceniowe.

## 3. BADANIA SYMULACYJNE KÓŁ Z ZUŻYTYMI ZĘBAMI

Zużycie pittingowe, będące jedną z form powierzchniowego zużycia zmęczeniowego, zamodelowano zgodnie z [1] przez zmianę amplitudy i fazy charakterystyki sztywności zazębienia oraz wzrost współczynnika tarcia międzyzębnego. Badania symulacyjne prowadzono dla kół zębatych, dla których przeprowadzono dostrojenie modelu [3, 4] stanowiska FZG [2], a których parametry geometryczne przedstawiono w tabeli 1. Prędkość obrotowa koła wynosiła około 1800 obr./min, moment obciążenia  $M=303$  Nm, co odpowiadało obciążeniu jednostkowemu 2,15 MPa.

Badania prowadzono dla kół nowych (bez zużycia) oraz z zużyciem pittingowym powierzchni roboczych zębniaka i koła. Wygląd zębniaka z wyraźnie dostrzegalnym zużyciem pittingowym powierzchni roboczych zębów przedstawiono na rys. 1.

Analizom poddano sygnały prędkości drgań w łożysku wału koła przekładni badanej stanowiska FZG. Do analiz wykorzystano transformatę Fouriera oraz transformatę Wignera-Ville'a z oknem filtracyjnym Choi-Williamsa opisaną zależnością:

$$WVD_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

gdzie:

$x(t)$  – sygnał analizowany,

$x^*(t)$  – sygnał zespolony sprzężony z  $x(t)$ ,

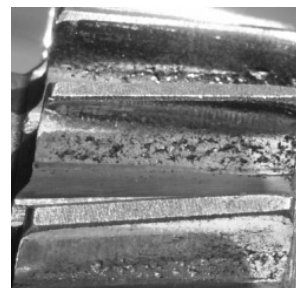
$\tau$  – przesunięcie w dziedzinie czasu.

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono symulowany przebieg czasowy (okres 12 obrotów koła) oraz widmo prędkości drgań wału koła w przypadku przekładni odpowiednio bez oraz z zużyciem powierzchni roboczych zębów.

Tablica 1

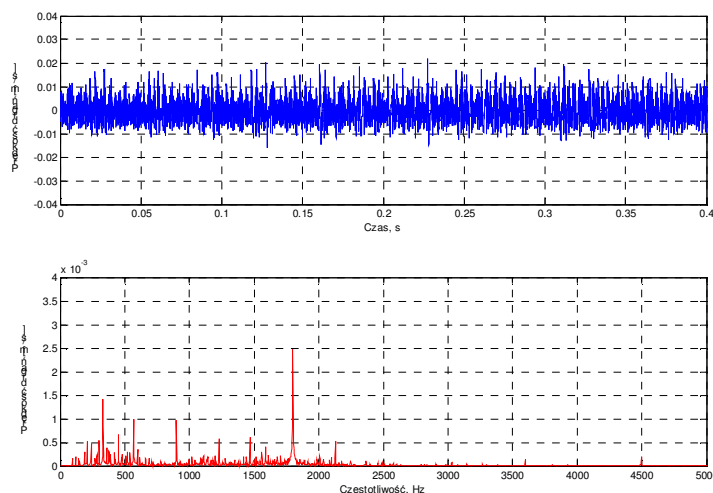
Parametry kół zębatach przekładni badanej stanowiska FZG

Liczba zębów zębniaka, $z_1$ [-]	19
Liczba zębów koła, $z_2$ [-]	30
Kąt pochylenia linii zęba, $\beta$ [°]	15
Współczynnik przesunięcia zarysu zębniaka, $x_1$ [-]	0,500
Współczynnik przesunięcia zarysu koła, $x_2$ [-]	0,295
Moduł nominalny, $m_n$ [mm]	3,5
Nominalny kąt przyporu, $\alpha_0$ [°]	20
Odległość osi współpracujących kół, $a_w$ [mm]	91,5
Szerokość zazębienia, $b$ [mm]	56
Wskaźnik zazębienia, $\varepsilon_\alpha$ [-]	1,36



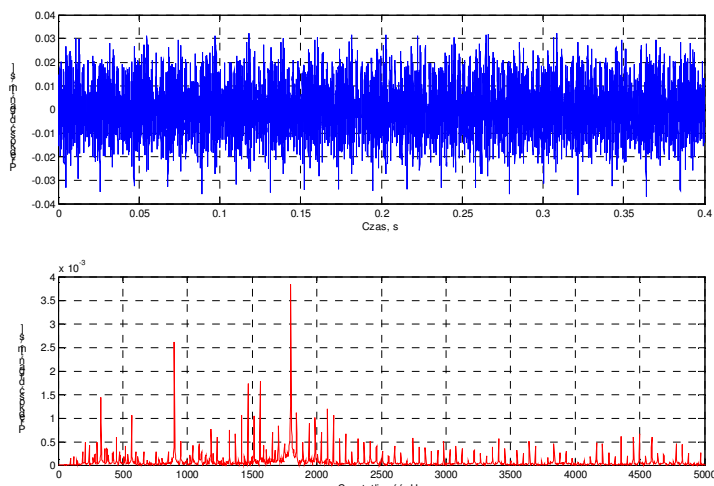
Rys. 1. Pitting na powierzchniach roboczych zębów zębniaka

Fig. 1. Pitting on the tooth surface



Rys. 2. Przebieg czasowy oraz widmo prędkości drgań wału koła przekładni bez zużycia powierzchni roboczych zębów

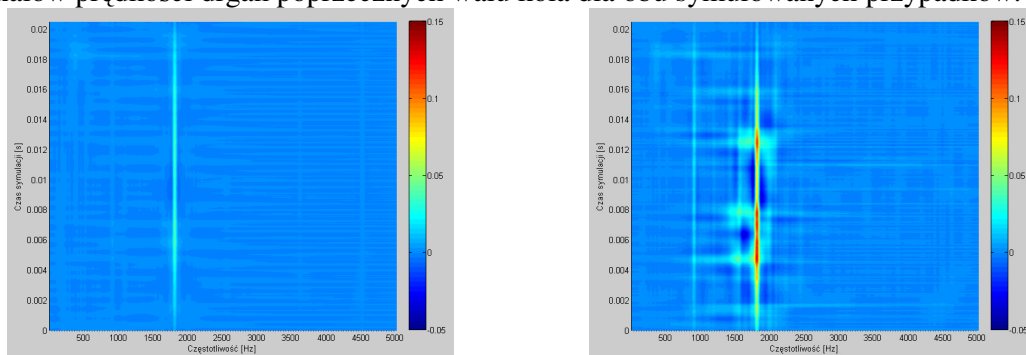
Fig. 2. Wheel without pitting wear on the tooth surface shaft vibration velocity time course and spectrum



Rys. 3. Przebieg czasowy oraz widmo prędkości drgań wału koła przekładni z zużyciem pittingowym powierzchni roboczych zębów

Fig. 3. Wheel with pitting wear on the tooth surface shaft vibration velocity time course and spectrum

Na rysunku 4 przedstawiono czasowo-częstotliwościowe rozkłady Wignera Ville'a sygnałów prędkości drgań poprzecznych wału koła dla obu symulowanych przypadków.



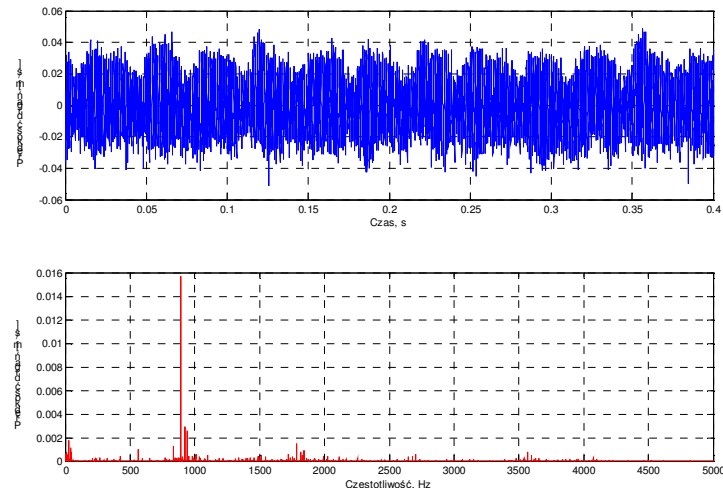
Rys. 4. Czasowo-częstotliwościowy rozkład Wignera Ville'a sygnału prędkości drgań wału koła dla przekładni nowej oraz z zużyciem pittingowym powierzchni roboczych zębów

Fig. 4. Wigner-Ville time frequency distribution of wheel shaft vibration velocity signal for new gear and gear with pitting wear on the tooth surface

#### 4. BADANIA DOŚWIADCZALNE KÓŁ Z ZUŻYTYMI ZĘBAMI

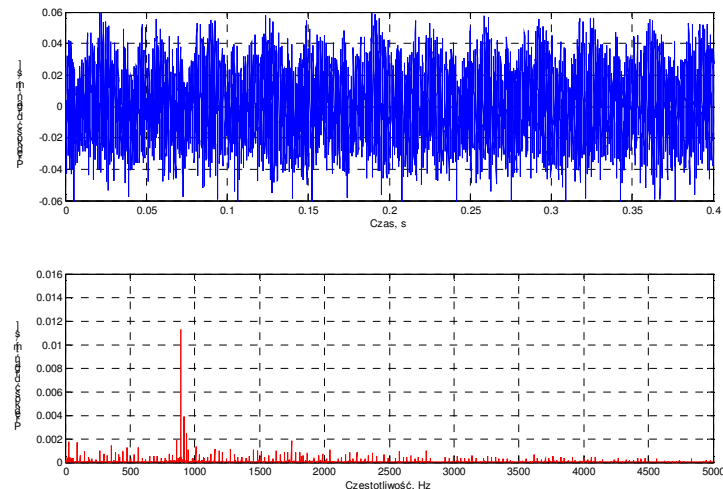
Badania doświadczalne przeprowadzono na stanowisku FZG (rys. 5). Parametry kół zębatych poddanych badaniom były identyczne z przedstawionymi w tabeli 1 z wyjątkiem szerokości, która wynosiła 20 mm. Prędkość obrotowa koła wynosiła około 1800 obr./min, moment obciążenia  $M=206$  Nm, co odpowiadało obciążeniu jednostkowemu 4,1 MPa.

Podczas badań rejestrowano przebiegi prędkości drgań poprzecznych oraz sygnały położenia wału zębniaka i koła. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono zarejestrowany przebieg czasowy oraz widmo prędkości drgań wału koła w przypadku przekładni odpowiednio bez oraz z zużyciem powierzchni roboczych zębów. Rozkłady Wignera Ville'a dla obu przypadków przedstawiono na rysunku 7.



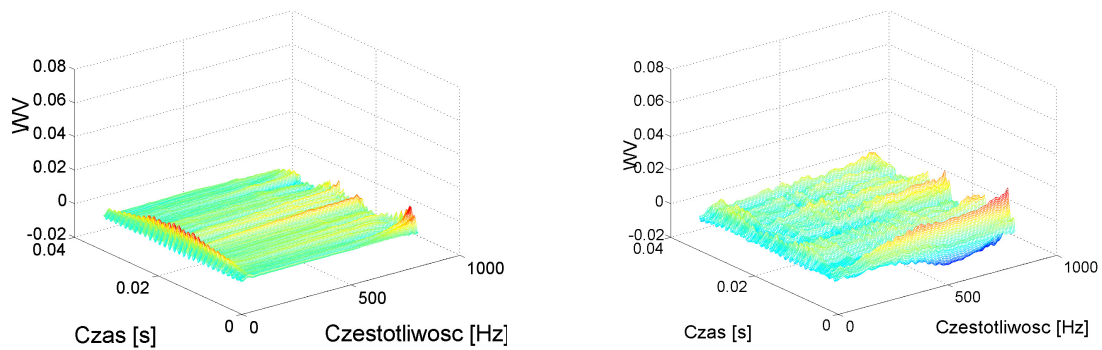
Rys. 5. Przebieg czasowy oraz widmo prędkości drgań wału koła przekładni bez zużycia powierzchni roboczych zębów

Fig. 5. Wheel without pitting wear on the tooth surface shaft vibration velocity time course and spectrum



Rys. 6. Przebieg czasowy oraz widmo prędkości drgań wału koła przekładni z zużyciem pittingowym powierzchni roboczych zębów

Fig. 6. Wheel with pitting wear on the tooth surface shaft vibration velocity time course and spectrum



Rys. 7. Czasowo-częstotliwościowy rozkład Wignera Ville'a sygnału prędkości drgań wału koła dla przekładni nowej oraz z zużyciem pittingowym powierzchni roboczych zębów [8]

Fig. 7. Wigner-Ville time frequency distribution of wheel shaft vibration velocity signal for new gear and gear with pitting wear on the tooth surface [8]

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki stanowią wstęp do dalszych badań nad wpływem zużycia na wibroaktywność przekładni zębatych. Przewiduje się dalszą rozbudowę modelu, tak aby stało się możliwe symulowanie innych rodzajów zużycia występujących w przekładniach, co pozwoli wykorzystać model do celów diagnostyki.

Na podstawie zaprezentowanych wyników badań można stwierdzić, że pitting przyczynia się do wzrostu niestacjonarnych zaburzeń sygnałów drganiowych, co można dostrzec w postaci ilościowych i jakościowych zmian rozkładów WV.

## Bibliografia

1. Choy F., Polyshchuk V., Zakrajsek J., Handschuh R., Townsen D.: Analysis of the effects of surface pitting and wear on the vibration of a gear transmission system. *Tribology International*, Vol. 29, No. 1, 1996.
2. Dąbrowski Z., Radkowski S., Wilk A.: *Dynamika przekładni zębatych – Badania i symulacja w projektowaniu eksploatacyjnie zorientowanym*. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa – Katowice – Radom 2000.
3. Łazarz B., Peruń G.: Identification and verification of simulation model of gears working in circulating power system. *Diagnostyka*, nr 4 (52)/2009.
4. Łazarz B., Peruń G.: Modelowanie przekładni zębatych pracujących w układzie mocy krążącej. XXXV Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2008.
5. Müller L.: *Przekładnie zębate – dynamika*. WNT, Warszawa 1986.
6. Nadolny K.: *Tribologia kół zębatych. Zagadnienia trwałości i niezawodności*. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii ITE, Radom 1999.
7. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Badania symulacyjne zużycia zębów kół na potrzeby diagnostyki przekładni. *Przegląd Mechaniczny*, Nr 3-4, 1997.
8. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Metody przetwarzania sygnałów drganiowych w diagnozowaniu przekładni zębatych. 3<sup>rd</sup> International Congress of Technical Diagnostics Diagnostics ' 2004.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

*Praca wykonana w ramach projektu BK-293/RT2/2009*