

Michał JUZEK<sup>1</sup>, Grzegorz WOJNAR<sup>2</sup>

## **ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA WYBRANYCH ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH KÓŁ ZĘBATYCH W CELU REDUKCJI DRGAŃ GENEROWANYCH PRZEZ PRZEKŁADNIE ZĘBATA**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wybrane konstrukcje kół zębatych oraz dokonano ich analizy względem możliwości zastosowania w celu redukcji drgań emitowanych w trakcie pracy przekładni zębatej. Przedstawiono analizę i symulację pracy modelu geometrycznego rozwiązania konstrukcyjnego. Zaprezentowano wybrane wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych dla rozwiązania wykorzystującego wahliwe łożyskowanie koła zębatego.

**Słowa kluczowe:** wibroaktywność przekładni zębatej, konstrukcja kół zębatych

## **ANALYSIS OF SELECTED GEAR CONSTRUCTIONS AND THEIR APPLICATION AS A CHANCE OF VIBRATIONS REDUCTION GENERATED BY GEARBOX**

**Summary:** The paper presents selected constructions of gears and analysis the possibility of using these types of gears to reduce the vibrations generated during the gearbox operation. The analysis and operation simulation of geometric model is presented. Selected results of the experimental research which was conducted for the solution with self-aligning bearing are presented.

**Keywords:** gearbox vibroactivity, construction of gears

### **1. Wstęp**

Przekładnia zębata jako zespół umożliwiający przenoszenie zmianę wartości przenoszonego momentu obrotowego oraz prędkości obrotowej stanowi część wielu układów napędowych. Przekładnie wykorzystywane są w budowie różnych maszyn i urządzeń przemysłowych, ale również z powodzeniem stosowane są w konstrukcji wielu środków transportu [1,2]. Niezależnie od przeznaczenia przekładnie zębate

---

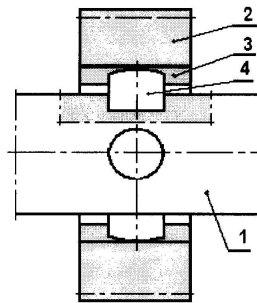
<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Wydział Transportu, email: [michal.juzek@polsl.pl](mailto:michal.juzek@polsl.pl)

<sup>2</sup> dr hab. inż. prof. PŚI, Politechnika Śląska, Wydział Transportu, email: [grzegorz.wojnar@polsl.pl](mailto:grzegorz.wojnar@polsl.pl)

powinny charakteryzować się możliwie niską emisyjnością drgań i towarzyszącego im hałasu, które w negatywny sposób oddziałują na otoczenie obiektu, a w przypadku środków transportu, na pasażerów [1]. Nieustannie poszukuje się możliwości i rozwiązań konstrukcyjnych mogących ograniczyć drgania generowane podczas pracy przekładni. Są to obszary związane między innymi z: doбором odpowiedniej konstrukcji i sztywności kadłuba przekładni, doбором odpowiednich parametrów sprzęgieł oraz łożysk, geometrią zarysu zębów kół, charakterystyką środków smarnych przekładni [3-8]. Należy jednak pamiętać, że jedno z głównych źródeł drgań pracującej przekładni zębatej stanowi strefa zazębienia współpracujących kół. Wszelkie odchyłki wykonania zarysu zęba, błędy montażu elementów przekładni, odkształcenia wałów przyczyniają się do powstania nierównomiernego rozkładu obciążeń na szerokości zazębienia, co z kolei niekorzystnie wpływa na poziom generowanych drgań. W pracy przedstawiono wybrane rozwiązania kół zębatych oraz dokonano ich analizy pod kątem możliwości zastosowania w celu redukcji drgań emitowanych w trakcie pracy przekładni zębatej.

## 2. Wahliwe osadzenie piasty koła względem czopa wału z wykorzystaniem czterech walców

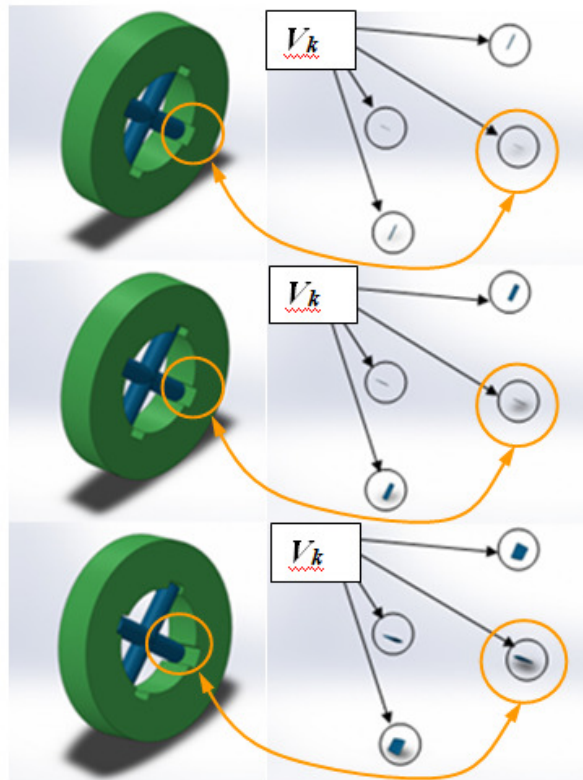
Przedstawione w zgłoszeniu patentowym PL 379605 rozwiązanie konstrukcyjne polegająca na wahliwym połączeniu czopa wału z piastą koła zębatego. W konstrukcji takiego połączenia zastosowano cztery elementy o kształcie walca, które rozmieszczone zostały po na obwodzie czopa wału promieniowo w równych odstępach (między kolejnymi walcami zachowany został kąt prosty). Drugi koniec każdego walca umieszczony został w rowku na wewnętrznej powierzchni piasty koła. Rowki piasty również rozmieszczano w równych odstępach co 90 stopni. Posiadają one prostokątny przekrój oraz są równoległe do osi obrotu. Powierzchnia czoła walca znajdująca się w rowku piasty jest zaokrąglona promieniem, którego długość odpowiada odległości od dna rowka do osi obrotu czopa[9].



Rysunek 1. Schemat wahliwego osadzenia koła na wale. Opis oznaczeń: 1-czop wału, 2-koło zębate, 3-rowek o przekroju prostokątnym, 4-wałek. Źródło: [9]

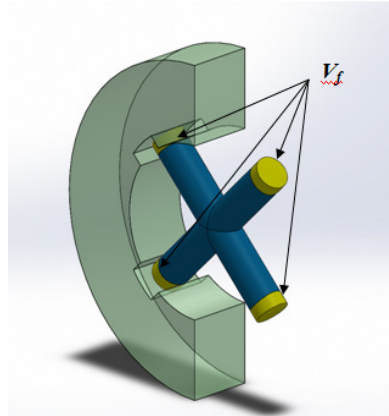
Przedstawione rozwiązanie konstrukcyjne ma na celu umożliwienie odchylenia się piasty koła zębatego względem osi czopa wału, na którym zostało umieszczone. Takie rozwiązanie może umożliwić korzystniejszy rozkład obciążenia na szerokości zazębienia, co z kolei pozytywnie wpływa na ograniczenie drgań generowanych podczas pracy przekładni, których źródłem jest strefa zazębienia. [9].

Na potrzeby analizy opisanego powyżej rozwiązania utworzono model trójwymiarowy w środowisku CAD oddający istotne cechy analizowanego rozwiązania oraz zasymulowano jego pracę dla różnych położeń piasty względem czopa wału. W przypadku niezerowych wartości kąta pomiędzy osią czopa wału a osią koła zębatego  $\varphi$  występuje zjawisko nakładania się powierzchni bocznych walców krzyżaka oraz wewnętrznej powierzchni rowków piasty. Zjawisko to narasta wraz ze wzrostem wartości kątem wychylenia piasty koła i zostało zilustrowane na rysunku 2.



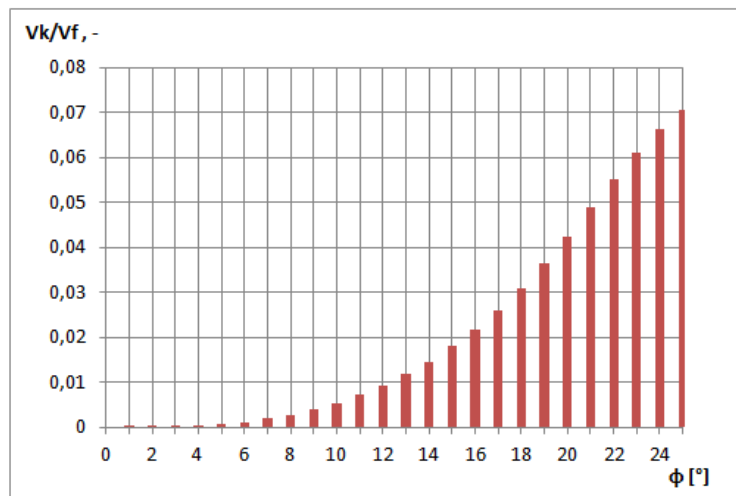
Rysunek 2. Symulacja pracy wahliwego osadzenia piasty w środowisku CAD oddający cechy istotne analizowanego rozwiązania: a) wychylenie dla kąta pomiędzy osią czopa wału a osią koła zębatego wynoszącego 1 stopień, b) wychylenie dla kąta pomiędzy osią czopa wału a osią koła zębatego wynoszącego 3 stopnie, c) wychylenie dla kąta pomiędzy osią czopa wału a osią koła zębatego wynoszącego 10 stopni;  $V_k$  – objętość powstająca w wyniku nałożenia się (kolizji) pomiędzy ramionami krzyżaka a piastą

Przedstawiona sytuacja może negatywnie wpływać na trwałość połączenia oraz znacząco przyspieszyć degradację powierzchni walców oraz rowków piasty. Ponadto fakt występowania kolizji elementów połączenia może stanowić dodatkowe źródło drgań w trakcie pracy przekładni zębatej.



Rysunek 3. Fragmenty ramion krzyżaka znajdujące się w rowkach piasty stanowiące objętość  $V_f$

W celu dalszej analizy przedstawionego rozwiązania konstrukcyjnego zaproponowano bezwymiarowy współczynnik stanowiący iloraz objętości kolizyjnej  $V_k$  (Rysunek 2) oraz objętości fragmentów krzyżaka znajdujących się w rowkach piasty  $V_f$  (Rysunek 3). Wartości współczynnika  $V_k/V_f$  w funkcji kąta  $\varphi$  mierzonego pomiędzy osią czopa wału a osią koła zębatego przedstawiono na rysunku 4.



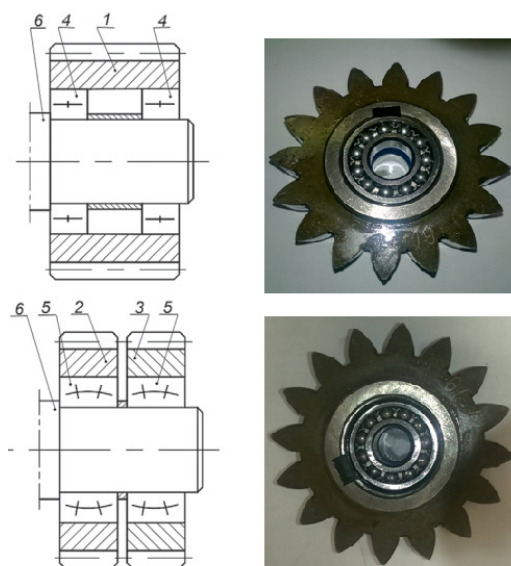
Rysunek 4. Wykres bezwymiarowego współczynnika  $V_k/V_f$  w funkcji kąta odchylenia piasty koła zębatego  $\varphi$

### 3. Wahliwe osadzenie dzielonych kół satelitarnych przekładni obiegowej

W przypadku przekładni planetarnych ich koła satelitarne współpracują jednocześnie z kołem słonecznym oraz wewnętrznym uzębionym. Do osadzenia kół satelitarnych na osiach jarzma najczęściej wykorzystywane są dwa łożyska z elementami tocznymi

w postaci kulek lub wałeczków. Taki sposób osadzenia kół oraz często ich znaczna szerokość, pomimo zachowania dużych dokładności wykonania jak i montażu przekładni, mogą przyczynić się do powstania nierównomierności w rozkładzie obciążenia na szerokości zazębienia. Z kolei nierównomierny rozkład obciążenia w znaczący sposób podnosi prawdopodobieństwo zwiększonej emisji drgań podczas pracy samej przekładni. W celu poprawy rozkładu obciążenia w pracy [9] zaproponowano innowacyjny sposób podziału na szerokości koła oraz osadzenia kół satelitarnych na czopach jarzma. Sumaryczna szerokość powstałych w wyniku podziału kół jest taka sama jak szerokość pojedynczego szerokiego koła. Ponadto do osadzenia węższych kół na osiach jarzma przekładni zastosowano po jednym łożysku wahlwym na każde z nich. Taka niezależność łożyskowania oraz dodatkowa możliwość odchylenia się koła znacząco zwiększa jego podatność oraz umożliwia korzystniejszy rozkład obciążenia na szerokości zęba [9,10].

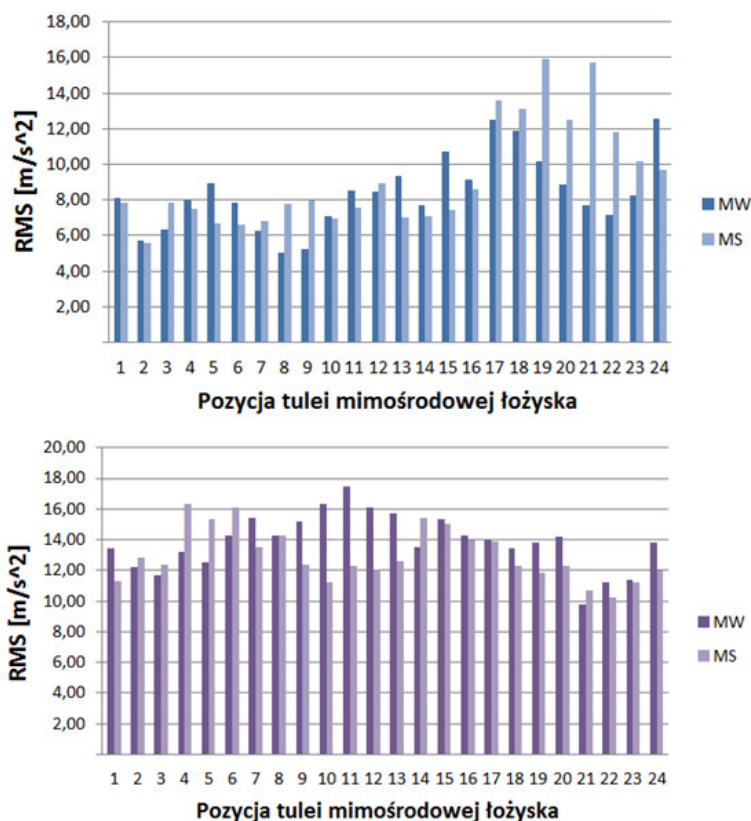
Przedstawione rozwiązanie zostało zaprezentowane w przypadku przekładni obiegowej natomiast autorzy niniejszego artykułu podjęli próbę zaadoptowania sposobu montażu wąskich kół satelitarnych do klasycznej przekładni walcowej. Na rysunku 5 przedstawiono w sposób schematyczny oryginalne rozwiązanie oraz jego adaptację na potrzeby badań na przekładni zębatej walcowej (zdjęcia po prawej).



*Rysunek 5. Schemat podziału koła satelitarnego wraz z łożyskowaniem. Opis oznaczeń: 1-wieniec koła klasycznego, 2, 3-wieńce zębate węższych kół powstałych przez podział szerokiego koła, 4-łożysko toczne zwykłe, 5-łożyska toczne wahliwe, 6-czop jarzma kół satelitarnych. Źródło:[10, materiały własne]*

Badania przeprowadzono na stanowisku służącym do testowania przekładni pracujących w układzie mocy krążącej. W ich trakcie zastosowano dwa rodzaje osadzenia koła zębatego na nieruchomej osi, umożliwiające wychylenie kątowe koła względem nieruchomej osi oraz drugie, które uniemożliwiało owe wychylenie. Badania przeprowadzono dla różnych częstotliwości obrotowych, a w celu

wymuszenia zmiany rozkładu obciążenia na szerokości zazębienia zmieniano względne położenie osi przekładni doprowadzając do ich nierównoległości (12 pozycji osi). Przykładowe wyniki zmierzonych sygnałów drganiowych przedstawiono na rysunku 6.



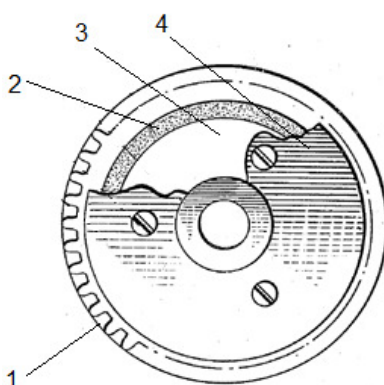
Rysunek 6. Wartości skuteczne RMS uzyskanych sygnałów drganiowych w funkcji pozycji tulei mimośrodowej łożyska oraz metody mocowania koła zębatego na osi nieruchomej (MW- mocowanie wahlwe, MS- mocowanie stałe); przekładnia pracowała z częstotliwością obrotową  $f_o=20$  Hz(górny) oraz  $f_o=40$  Hz(dolny)

Analiza otrzymanych wyników badań wykazuje możliwość redukcji generowanych w trakcie pracy przekładni zębatej drgań w wyniku zastosowania mocowania umożliwiającego kątowe wychylenia koła zębatego względem osi, na której jest zamocowane.

#### 4. Konstrukcja koła zębatego wyposażonego w pierścień wykonany z materiału podatnego

Ideowo zbliżone rozwiązania konstrukcyjne koła zębatego wyposażonego w pierścień wykonany z materiału podatnego przedstawione zostały w dwóch zgłoszeniach patentowych o numerach US 2307129 oraz US 307705. Opisane w nich koła zębate charakteryzuje element w postaci pierścienia. Pierścień wykonany jest z materiału

podatnego, który pod wpływem nacisku może ulegać odkształceniu. Element podatny umiejscowiony został w taki sposób, że dzieli koło na dwie części płaszczyzną walca, którego oś jest współliniowa z osią obrotu koła. Promień podstawy walca nie został dokładnie określony przez autorów. Taki podział skutkuje oddzieleniem piasty koła zębatego od jego wieńca zębatego. Pierścień podatny może stanowić jeden element lub jak w przypadku patentu US 307705 dwa osobne odpowiednio węższe elementy. Siła tarcia występująca na powierzchni styku pierścienia podatnego z piastą oraz pierścienia podatnego z wieńcem zębatym umożliwia przekazywanie momentu obrotowego między tymi elementami. W patencie US 2307129 dodatkowo zastosowano dwie tarcze przymocowane do obu powierzchni bocznych koła za pomocą połączenia śrubowego. Ich zadaniem jest ograniczenie nadmiernych ruchów pierścienia oraz wieńca koła wzdłuż osi obrotu wału. Zastosowanie elementu wykonanego z materiału podatnego umożliwia niewielkie odchylenie kątowe wieńca zębatego względem piasty koła [12, 13]. Ta właściwość opisanej konstrukcji koła zębatego może przyczynić się do wyrównania rozkładu obciążenia na szerokości zazębienia, a co za tym idzie, redukcji drgań pracującej przekładni zębatej. Dodatkowo materiał podatny charakteryzuje większy współczynnik tłumienia co również w znaczącym stopniu może wygaszać drgania pochodzące ze strefy zazębienia współpracujących kół. Autorzy niniejszej pracy planują dogłębne badania opisanego rozwiązania.



Rysunek 7. Konstrukcja koła zębatego wyposażonego w pierścień wykonany z materiału podatnego: 1 – wieńiec zębony, 2 – pierścień podatny, 3 – piasta koła, 4 – tarcza boczna. Źródło: [13].

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wybrane innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne oraz sposoby montażu kół zębatych. Główną cechą łączącą wszystkie z opisanych rozwiązań jest zwiększenie podatności koła zębatego, co z kolei zapewnia możliwość zmniejszenia niepożądanych skutków nierównomiernego rozkładu obciążenia wzdłuż linii styku zębów współpracujących kół oraz przyczynia się do ograniczenia drgań generowanych w strefie zazębienia przez pracującą przekładnię.

W pracy przedstawiono analizę modelu geometrycznego oraz symulację pracy rozwiązania składającego się z czterech elementów walcowych. Pomimo stosunkowo

niskiego kosztu wykonania oraz nieskomplikowanej budowy tego rozwiązania zauważono, że w pewnych położeniach wychylenie koła zębatego powoduje kolizję powierzchni elementów walcowych i wewnętrznych ścian rowków znajdujących się w piastce koła. Przedstawione zjawisko może przyczynić się do zmniejszenia trwałości mocowania koła oraz mieć niepożądany wpływ na wibroaktywność przekładni.

W artykule przedstawiono również wybrane wyniki badań przeprowadzonych dla drugiego z opisywanych rozwiązań konstrukcyjnych montażu koła na czopie wału. Na podstawie wyników i analizy otrzymanych sygnałów drganiowych można stwierdzić, iż sposób montażu z wykorzystaniem łożyska wahliwego może przyczynić się do redukcji poziomu drgań pochodzących ze strefy zazębienia.

## LITERATURA

1. ŁAZARZ B.: Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej jako podstawa projektowania., Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Katowice-Radom 2001.
2. MADEJ H.: Minimalizacja aktywności wibroakustycznej korpusów przekładni zębatych., Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Katowice-Radom 2003.
3. FIGLUS T., WILK A., MADEJ H.: A study of the influence of ribs shape on the gear transmission housing vibroactivity., *Transport Problems* (2010) Vol. 5, Nr 1, 63-69.
4. GREGA R., HOMIŠIN J., KRAJŇÁK J., URBANSKÝ M.: Analysis of the impact of flexible couplings on gearbox vibrations. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport.* (2016), 91, 43-50.
5. WOJNAR G.: Minimization of dynamic forces in gear meshing by selection of the flexible couplings parameters. *Journal of Kones. Powertrain and Transport* (2010) Vol.17, No.3, 497-504.
6. FLEMING D.P.: Effect of Bearing Dynamic Stiffness on Gear Vibration, *NASA/TM – 2002-211356* (2002), 10-18.
7. WIECZOREK A.: Rola smarowania w ograniczeniu hałasu towarzyszącego eksploatacji przekładni zębatych., *MECHANIZACJA I AUTOMATYZACJA GÓRNICICTWA* (2010) Vol. 478, No. 12, 34-39.
8. ŁAZARZ B., PERUŃ G.: Influence of construction factors on the vibrational activity of the gearing., *Transport Problems* (2012) Vol.7, No.2, 95-102.
9. KOWAL A.: Kształtowe połączenie wahliwe czopa z piastą, Zgłoszenie patentowe: PL 379605, 2007.
10. FILIPOWICZ K.: Stanowisko badawcze do wyznaczenia wpływu dzielonych kół satelitów na obciążenie w zazębieniach przekładni planetarnych., *Przegląd Mechaniczny, Zeszyt 4*, 2014.
11. KOWAL A., SKOĆ A., SPAŁEK J., STACHURSKI J., SUCHOŃ J.: Przekładnia obiegowa, Zgłoszenie patentowe: PL 321717, 1999.
12. BARANY E., HINES E.G.: Shockproof gear, Zgłoszenie patentowe: US 2307129, 1943.
13. FENELON P.J.: Stress dissipation gear and method of making same, Zgłoszenie patentowe: US 307705, 1994.