

# **BADANIE ŚLADU WSPÓŁPRACY I GENEROWANIE WYKRESÓW RUCHOWYCH SPIRALNYCH PRZEKŁADNI STOŻKOWYCH W ŚRODOWISKU PROGRAMÓW CAD**

**Piotr SKAWIŃSKI<sup>1</sup>  
Przemysław SIEMIŃSKI<sup>2</sup>**

## **STRESZCZENIE**

*Na jakość przekładni wpływa nie tylko ślad współpracy (kształt, wielkość, położenie) ale także przenoszenie ruchu z elementu napędzającego (zębniaka) na drugi człon przekładni (koło). Odzwierciedleniem sposobu przekazywania ruchu są wykresy ruchowe i wykresy odchyłek prędkości kątowej. W artykule przedstawiono dla wybranej przekładni kształtowo-obwiedniowej kolejne fazy dopracowywania śladu współpracy i w ślad za tym stosowne wykresy obrazujące związek między przemieszczeniem kątowym koła i napędzającym go zębniakiem. Zarówno badanie śladu współpracy i wykresy ruchowe wykonano w środowisku programów CAD.*

## **1. WSTĘP**

Zespół Technologii Przekładni Stożkowych, w tym autorzy niniejszego artykułu zajmują się generowaniem modeli bryłowych przekładni stożkowych i hipoidalnych o spiralnej linii zęba na drodze symulacji obróbki. Do tego celu wykorzystywany jest własny system obliczeniowy KONTEPS i aplikacje w języku Grip środowiska Unigraphics. KONTEPS wspomaga obliczenia

---

<sup>1</sup> dr inż. Piotr Skawiński – Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej

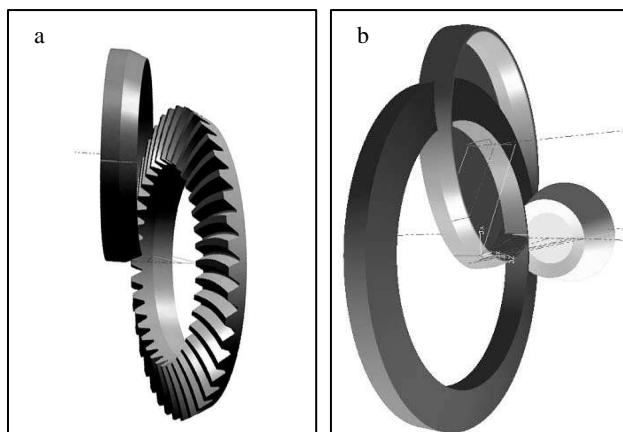
<sup>2</sup> dr inż. Przemysław Siemiński – Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej

konstrukcyjno-technologiczne dla przekładni obwiedniowych i kształtowo-obwiedniowych m. inn. w systemie Gleasona. Na podstawie obliczeń ustawczych technologii bazowej i głowicy frezowej, wspomniana aplikacja po wcześniejszym wygenerowaniu otoczki koła i zębniaka, prowadzi wirtualną symulację obróbki, w wyniku której uzyskuje się modele bryłowe bądź powierzchniowe członów przekładni. Wirtualny montaż może być wykonany w tym samym środowisku (Unigraphics) bądź w innym systemie CAD np. SolidWorks na drodze importu pliku. Zadając przenikanie brył odpowiadające w przybliżeniu odkształceniom powierzchni rzeczywistych przekładni (wykonanych w stanie miękkim), bada się ślad współpracy.

Ślad współpracy nie jest jedynym czynnikiem będącym miarą jakości przekładni. Ważnym jest też sposób przekazywania ruchu napędzanemu elementowi. To, w jaki sposób stała prędkość kątowa zębniaka odbierana jest przez współpracujące koło, mówią wykresy ruchowe i wykresy odchyłek prędkości kątowej. Badanie to przeprowadzono w środowisku modułu COSMOSMotion programu SolidWorks, wspieranym arkuszami kalkulacyjnymi i grafiką programu MS Excel.

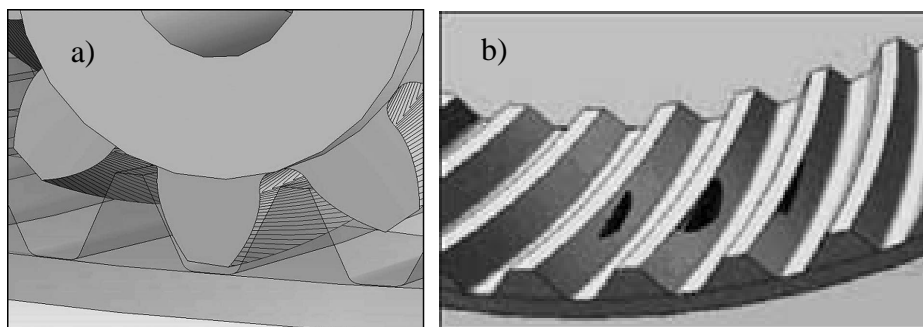
## 2. GENEROWANIE MODELI BRYŁOWYCH I WIRTUALNY MONTAŻ

Badania przeprowadzono na przekładni kształtowo-obwiedniowej o przełożeniu 9:40, kącie pochylenia linii zęba  $\beta = 35^\circ$ , kącie przyporu  $\alpha = 20^\circ$ , module czołowym  $m_t = 6,0$  mm, wysokości zęba (na zewnętrznej stronie wieńca)  $h = 10,62$  mm, nacinanej głowicą frezową o nominalnej średnicy 9 cali. Rysunek 1a i b przedstawia technologiczne układy kształtujące generujące modele bryłowe koła i zębniaka. Metoda technologiczna to SFM (Spiral Formate



Rys.1. Technologiczne układy kształtujące: a) koła, b) zębniaka

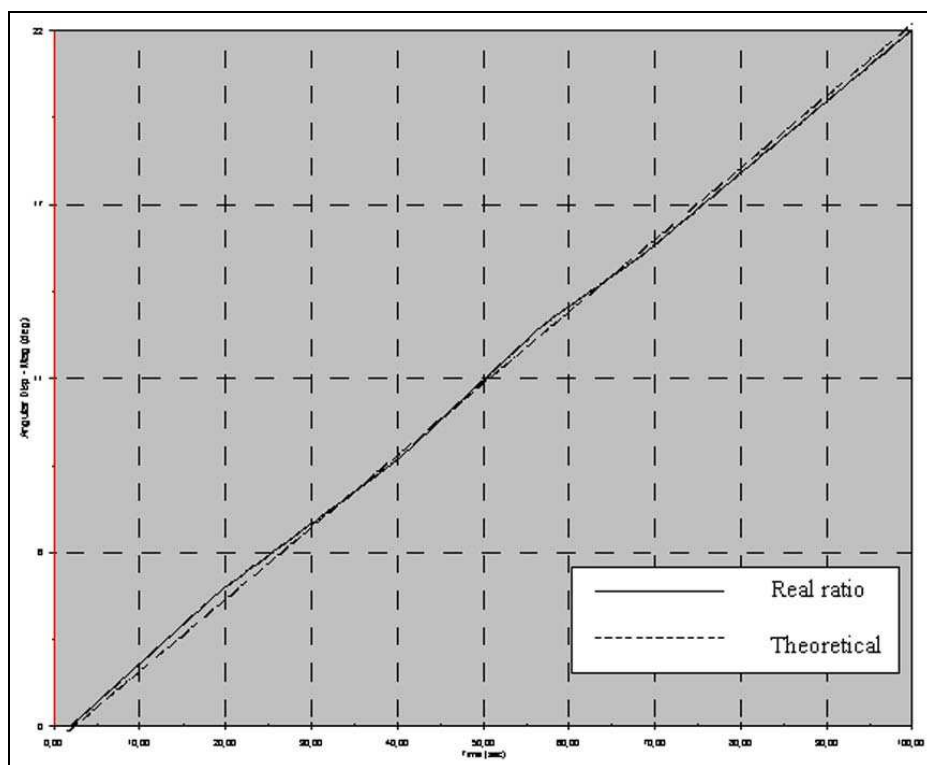
Modified Roll), w której koło wykonano głowicą dwustronną, zaś zębnik głowicami jednostronnymi. Wykonane modele bryłowe (pliki) zaimportowano do programu SolidWorks, w którym dokonano wirtualnego montażu (rys.2a) celem zbadania śladu współpracy. Ślad współpracy dla bazowych obliczeń technologicznych przedstawia rys. 2b. Kształt i położenie śladu wymaga korekty na poziomie poprawek proporcjonalnych I rzędu (operatorskich).



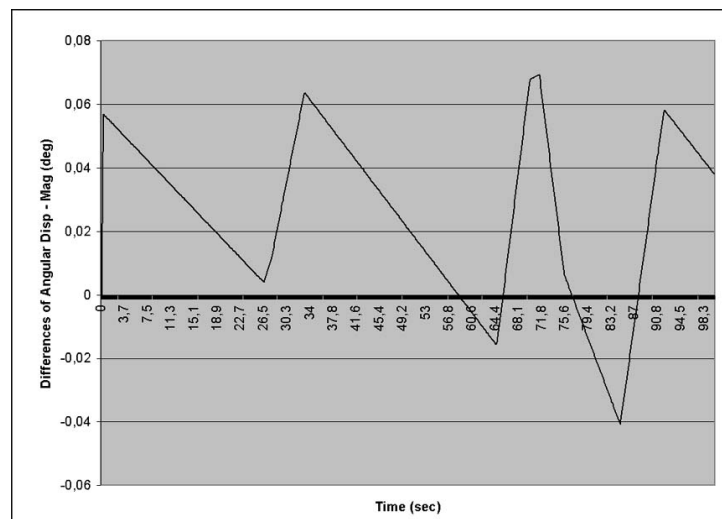
Rys. 2 . Przekładnia 9:40: a)montaż wirtualny, b) ślad współpracy

### 3. WYKRESY KĄTOWYCH PRZEMIESZCZEŃ KOŁA I KOREKTA ŚŁADU WSPÓŁPRACY

Dla tego śladu współpracy (strona wypukła koła – wklęsła [czynna] strona zębника) w module COSMOSMotion (SolidWorks) wykonano wykres kąтового przemieszczenia koła (rys.3) dla stałej prędkości kątowej zębника (linia przerywana na wykresie) wynoszącej 1 stopień kątowy w ciągu 1 sekundy w przedziale czasowym 100 sek. Odpowiada to 100 stopniom obrotu zębника zapewniającym z zapasem obserwację wejścia i wyjścia z przyporu zęba zębника. W analizie nie brano pod uwagę (nie symulowano) błędów wykonania jak np. błąd podziałki, bicie uzębienia itp. Nie uwzględniano też podatności kół traktując oba elementy przekładni jako idealnie sztywne. Do koła przyłożono niewielki moment hamujący ( w warunkach programu rozumiany jako tłumienie) eliminujący możliwość kontaktu biernych boków zębów. Z wykresu na rys. 3 widać, iż koło nie obraca się ze stałą prędkością kątową. Zmiany prędkości kątowej występują w obu kierunkach, co oznacza wyprzedzanie i opóźnianie koła w stosunku to teoretycznego przełożenia. Istnieje zatem błąd przełożenia kinematycznego mający inną, zmieniającą się wartość wzdłuż odcinka przyporu. Interesujący jest wykres odchyłek położenia kąowego (różnic prędkości kątowych) koła będący w charakterze podobnym do wykresu piły (rys. 4). Ten ostatni wykres sporządzono w programie Excel na

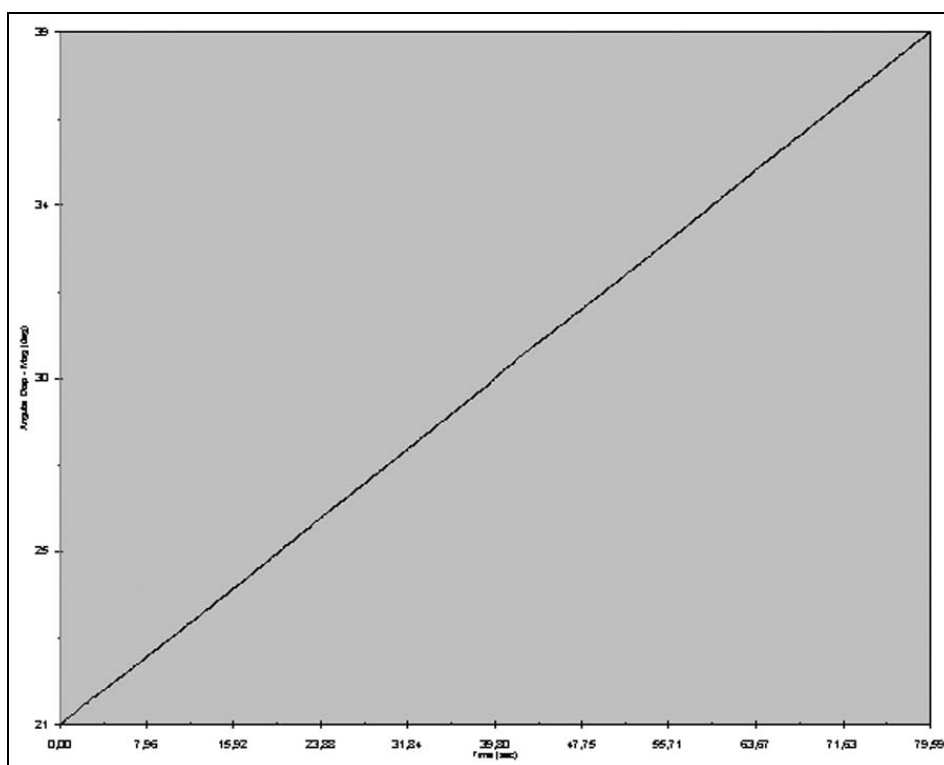


Rys. 3 . Wykres kątowych przemieszczeń koła (ustawienie bazowe)



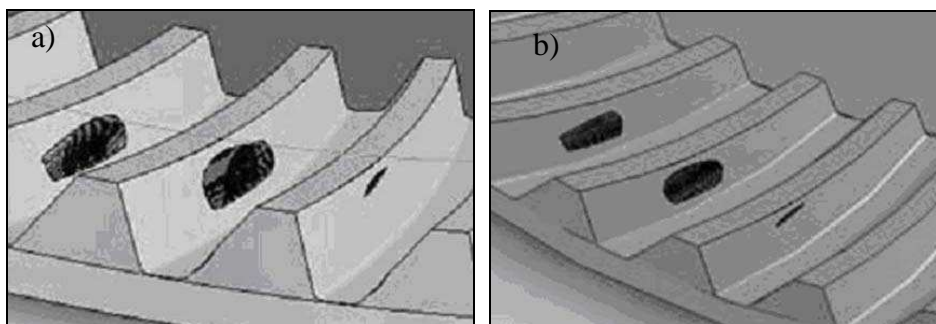
Rys. 4 . Odchyłki położenia kąтового koła (ustawienie bazowe)

podstawie danych zawartych w pliku programu COSMOSMotion, będącym źródłem wykresu na rys. 3. Ujemne wartości odchyłek położenia kąowego oznaczają cofanie się koła. Sytuacji opisanej wykresami 3 i 4 odpowiada ślad współpracy z rys. 2b. Jego kształt i położenie nie jest do zaakceptowania zwłaszcza, iż jest to ślad krawędziowy oraz jak widać z wykresu 4, występują ujemne odchyłki kąowego położenia koła. Oczekiwać należy, co potwierdzają badania na maszynie kontrolnej, iż ten rodzaj śladu współpracy jest źródłem hałaśliwej pracy przekładni. Korzystając z poprawek I rzędu, wprowadzono zmianę położenia osiowego zębniaka o  $\Delta X_p = -0.15$  mm (wycofanie zębniaka). Wykonano ponowną symulację obróbki budując nowy model bryłowy zębniaka, zbadano ślad współpracy (rys.6a) i wykonano wykres przemieszczeń kątowych koła (rys.5). Ślad współpracy uległ poprawie lecz w dalszym ciągu nie jest akceptowalny i wymagać będzie dalszych poprawek. Ślad odsunął się wyraźnie od głowy zęba lecz zaczyna dotykać stopy zęba koła, co oznacza przemieszczenie ku wierzchołkowi głowy zębniaka. Wprowadzono zatem

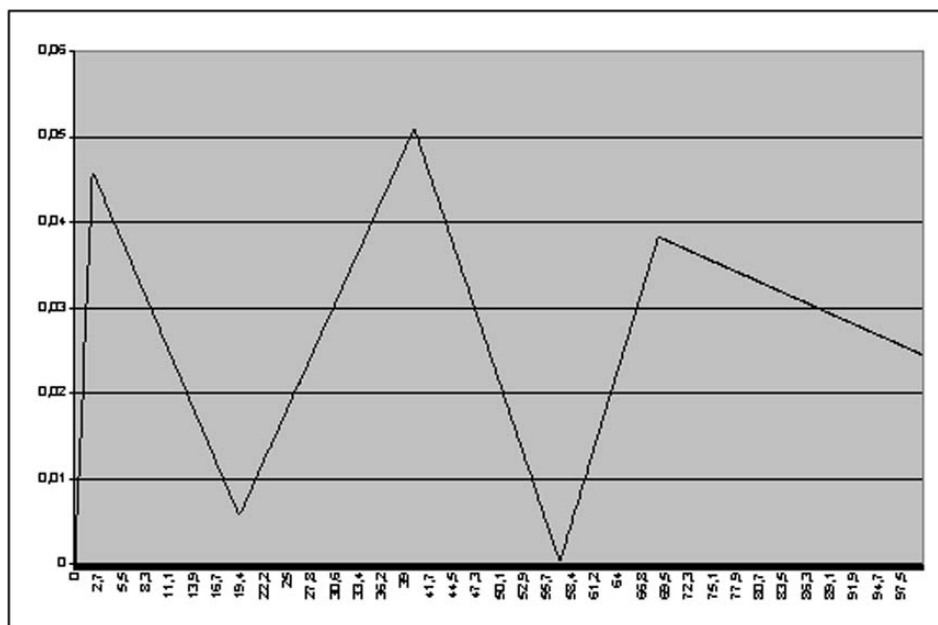


Rys. 5 . Wykres kątowych przemieszczeń koła dla  $\Delta X_p = -0.15$  mm

kolejną poprawkę a mianowicie poprawkę pochylenia linii zęba  $\Delta\beta = +30'$  (minut). Ponownie przeprowadzono symulację obróbki, wirtualny montaż i generowanie śladu współpracy (rys. 6b). Ślad ten jest wyraźnie lepszy (mając na uwadze kształt i położenie), to jednak częściowo, w niewielkim stopniu dotyka stopy koła (głowy zębniaka), mogą powodować hałaśliwą pracę przekładni. Dla tego śladu sporządzono kolejne wykresy. Obserwacje odchyłek położenia kąтового koła w programie COSMOSMotion przedstawiono na wykresie (rys. 7). Analiza wykresu z rys.7 pokazuje zmiany

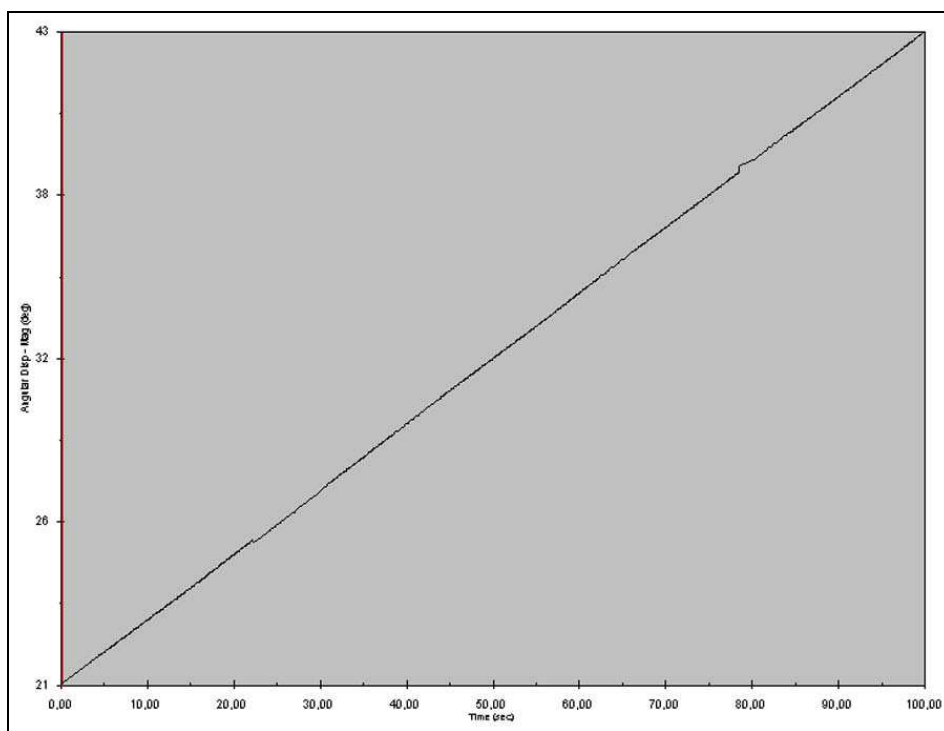


Rys.6. Ślad współpracy: a) dla  $\Delta X_p = -0.15$  mm, b) dla  $\Delta\beta = +30'$



Rys. 7. Odchyłki położenia kąтового koła ( $\Delta\beta = +30'$ )

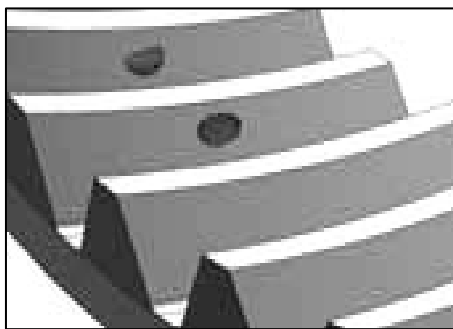
odchyłek położenia kąowego tylko jednostronne (dodatnie). Oznacza to zmiany położenia kąowego koła ruchem niejednostajnie zmiennym (przyspieszenia i opóźnienia) ale bez cofania się koła. Porównując ten wykres z wykresem z rys. 4 widać wyraźną korzystną zmianę błędu kinematycznego przekładni. Można przypuszczać (nie prowadzono badań stanowiskowych na maszynie kontrolnej po każdej poprawce I rzędu – jest to etap symulacji komputerowej), iż biorąc również pod uwagę ślad dolegania, poziom generowanego hałasu powinien być mniejszy. Ponieważ ślad współpracy jest nadal niesatysfakcjonujący, wprowadzono kolejną poprawkę I rzędu mającą na celu zmniejszenie szerokości śladu a więc zarysu zęba (wkłęsłej strony zębika). Zmniejszono zatem przełożenie odtaczania o  $\Delta i_{\text{odt}} = -0.003$ . Wykonano kolejną symulację obróbki generując model bryłowy zębika. Ślad współpracy pokazano na rys.9.



Rys. 8 . Wykres kątowych przemieszczeń koła dla  $\Delta i_{\text{odt}} = -0.003$

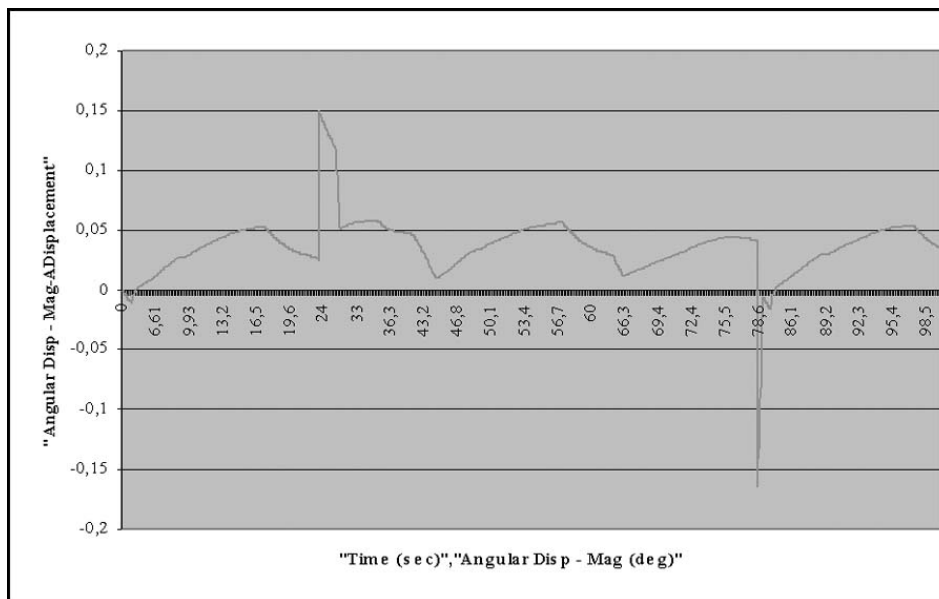
Kształt i położeniu śladu współpracy można uznać za poprawne. Zastrzeżenia może budzić jego długość. Parametr ten związany jest z krzywizną wzdłużnej linii zęba a więc z doбором średnicy głowicy frezowej. Szacując procentową wielkość śladu współpracy należy wziąć pod uwagę zakładaną wielkość wzajemnego przenikania powierzchni w operacjach odejmowania brył na etapie

komputerowej symulacji współpracy (wielkość tę przyjmowano jednakową we wszystkich próbach). Istotnym czynnikiem jest wyjściowa (obliczeniowa) długość śladu dolegania, którą przyjęto dla strony wklęsłej zębniaka  $P3b_{WK} = 0.17$ . Przyjęcie tak krótkiego śladu na etapie obliczeń konstrukcyjno-technologicznych wynikało z faktu zastosowania głowicy dwustronnej do obróbki zębniaka ale o promieniach odpowiadających obróbkom jednostronnym. Oznacza to, iż ta sama głowica służy do obróbki (z pełnego materiału) na gotowo strony wklęsłej zębniaka a po przestawieniu obrabiarki strony wypukłej zębniaka. Z wieloletniego doświadczenia produkcyjnego założono, iż w rzeczywistości (potwierdza to wykonanie przekładni w metalu), ślad dolegania



przy kontroli na miękko zajmuje ok. 40% szerokości wieńca. Zaakceptowano zatem ten krótki ślad, gdyż jego wielkość zbliżona jest do założonego współczynnika, zaś z racji braku wyraźnego kontaktu z wierzchołkiem głowy i początkiem stopy zęba, nie powinien generować hałasu a przekładnia powinna pracować równomiernie. Na podstawie

Rys.9. Ślad współpracy dla  $\Delta i_{odt} = - 0.003$



Rys. 10. Odchyłki położenia kątownego koła ( $\Delta i_{odt} = - 0.003$ )



danych wykresu z rys.8 zilustrowano odchyłki położenia kąтового koła (rys. 10). Amplituda odchyłek co prawda jest taka sama jak w poprzednim przypadku (poprzednia poprawka: korekta kąta pochylenia linii zęba) lecz bez gwałtownych zmian ich wartości. Oznacza to bardziej płynną współpracę boków zębów. W konsekwencji przekładanej na mniejszy poziom hałasu przekładni. Wyjątek stanowi tu 24 i 79 stopień kąta obrotu zębniaka, gdzie widać znaczne zmiany wartości odchyłek a w ostatnim przypadku łącznie ze zmianą znaku oznaczającą chwilowy ruch wsteczny koła. Powtarzana parokrotnie analiza w module COSMOSMotion dawała te same rezultaty. Na tym etapie badań i przygotowywania publikacji, trudno jest wyjaśnić te znaczne chwilowe zmiany wartości i znaku odchyłek przy istnieniu akceptowalnego śladu współpracy (rys.9). Będzie to przedmiotem dalszych analiz.

#### **4. PODSUMOWANIE**

Stałe tendencje do podnoszenia jakości produkowanych przekładni wymagają kompleksowej oceny zarówno od strony śladu współpracy jak i płynności przenoszenia ruchu (wykresy ruchowe). W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania do tego celu w powiązaniu z modelami bryłowymi przekładni, modułu do analiz kinematycznych. Analizując w szczególności wykresy odchyłek położenia kąтового koła, można uzyskać dodatkową informację o przewidywanej płynności pracy przekładni, przekładającej się później na równomierne, bez zmiany obciążeń dynamicznych, przenoszenie momentu obrotowego. Zdaniem autorów konieczne jest podjęcie prac związanych ze znalezieniem korelacji: ślad współpracy – odchyłki położenia kąтового koła. Przedstawiona tu analiza, nawet dla konkretnej przekładni (9:40) jest jedynie wstępną oceną pozwalającą zmniejszyć liczbę prób na etapie dopracowywania śladu współpracy. Istnienie w rzeczywistym procesie technologicznym wielu uwarunkowań w tym przede wszystkim obróbki cieplnej, zmieni zapewne wielkości i charakter poprawek. Nie mniej jednak na etapie obliczeń konstrukcyjno-technologicznych wraz z powyższymi analizami, pozwoli na zredukowanie czasu i kosztów wytwarzania.

#### **LITERATURA**

- [1] Litvin F.L.: Fuentes A.: "Gear geometry and applied theory", Cambridge University Press, 2004.
- [2] Litvin F.L.: "Development of gear technology and theory of gearing", NASA, Lewis Research Center, 1999.
- [3] Dabrowski Z., Radkowski R., Wilk A.: "Dynamika przekładni zębatych" – „The dynamics of gears”, Warszawa, Katowice, Radom, 2000.
- [4] Skawinski P., Sieminski P.: "Tooth contact generation of spiral bevel gear in environment of CAD/CAM/CAE system" – "Generowanie w środowisku

systemów CAD/CAM/CAE śladu współpracy uzębienia przekładni stożkowej o krzywoliniowej linii zęba”, Priority Program “New Technologies”, Warsaw 2002, Poland.

[5] Skawinski P., Sieminski P.: ”Parametric solid modeling of spiral bevel gears and tooth contact generation”. Computer Integrated manufacturing. Advanced Design and Management. WNT,2003,Warsaw, Poland.

[6] Skawinski P., Sieminski P., Jedrzejczyk W.: „3D surface model of tooth side of spiral bevel gears” – “Przestrzenny model powierzchni bocznej zęba przekładni stożkowej”, XV Conference of Computer Aided Design, October, 2005, Poland.

[7] Skawinski P.: „Computer integrated design and manufacturing of spiral and hypoid bevel gears”, XI International Conference “Computer Simulation in Machine Design – COSIM2006”, Krynica Zdrój, August, 2006, Poland.

[8] Skawinski P., Jedrzejczyk W., Sieminski P.: “Application of CAD/CAM technology in designing and manufacturing of spiral bevel gears”, XVI International Conference FAIM2006, Ireland.

[9] Skawinski P.: “Computerized Integration of Design and Manufacturing of Spiral and Hypoid Bevel Gears” XVII International Conference FAIM2007, Philadelphia, 2007, USA.

[10] Skawinski P., Sieminski P.: „Application of SolidWorks COSMOSMotion module to generation of the spiral bevel gears motion graph”, XVIII International Conference FAIM2008, Skovde, 2008, Sweden.

## **TOOTH CONTACT DEVELOPMENT AND GRAPH MOTION GENERATION IN CAD PROGRAMS ENVIRONMENT**

### **SUMMARY**

*Presented above method is a next way to quality estimation of spiral bevel gears in aspect of kinematics inspection. System KONTEPS plus Unigraphics and designing process included tooth contact analysis, had been enriched in kinematics analysis which can be provided in one of popular CAD system SolidWorks and its module COSMOSMotion. These analysis are very important when is necessary to describe the dynamics of transmission gears. Proposed method requires an investigation in practice. It is the next step to increase quality of gear and also reduce manufacturing time and costs.*