

Jan CHAJDA, Andrzej GAZDECKI

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Analiza dokładności wykonania kół zębatach z wykorzystaniem symulacji cyfrowej współpracy jednostronnej

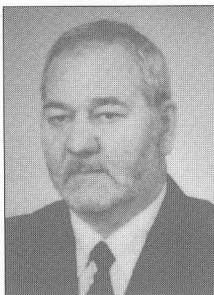
Prof. dr inż. Jan CHAJDA

Studia na Wydziale Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej ukończył w 1961 r., a w 1969 r. obronił pracę doktorską na tym samym wydziale. Promotorem był profesor Bronisław Kiepuszewski. W 1992 r. uzyskał tytuł profesora, a w 1997 r. powołany został na profesora zwyczajnego Politechniki Poznańskiej.

W początkowym okresie pracy naukowej zajmował się badaniami skrawalności oraz opracowaniem metod badań skrawalności. Później, pod wpływem pracy w przemyśle lotniczym ukierunkował się na metrologię wielkości geometrycznych - głównie dokładność i badanie współpracy jednostronnej kół zębatach, badania stereometrii powierzchni i błędów kształtu, technikę współrzędnościową oraz inżynierię jakości.

Na dorobek składa się przeszło 170 prac opublikowanych w czasopiśmie naukowych, konferencjach zagranicznych i krajowych, 31 patentów oraz 3 książki i 1 skrypt. Był promotorem 14 wypromowanych doktorów oraz recenzentem 27 rozpraw doktorskich, 5 rozpraw habilitacyjnych oraz 3 wniosków na tytuł profesora. Jest członkiem zwyczajnym Akademii Inżynierskiej w Polsce, a także członkiem Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN i Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn PAN.

jan.chajda@put.poznan.pl



Dr inż. Andrzej GAZDECKI

Studia wyższe ukończył w 1974 roku na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Poznańskiej. W roku 1982 obronił pracę doktorską. Od 1974 roku do chwili obecnej pracuje jako nauczyciel akademicki na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych. Specjalizuje się w metrologii i systemach pomiarowych, a w szczególności w systemach diagnozowania kół i przekładni zębatych oraz systemach zarządzania jakością i SPC. Prowadzi doradztwo w zakresie wdrażania systemów zarządzania jakością w organizacjach. Posiada certyfikaty audytora zarządzania jakością w podmiotach gospodarczych: TÜV CERT - Niemcy - Lead Auditor, BSI - Anglia, Polskiego Centrum Badań i Certyfikacji. Jest autorem 22 publikacji oraz ponad 40 referatów wydrukowanych z zakresu metrologii i systemów pomiarowych oraz z systemów zarządzania jakością.

gazdecki@sylaba.poznan.pl



Streszczenie

W referacie omówiono proces pomiaru kół zębatach metodą kompleksową, dający możliwość oceny kinematycznej zazębienia. Przedstawiono stanowisko badawcze do badania dokładności kół zębatach metodą współpracy jednostronnej, które zostało skonstruowane wykonane i przebadane w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej. Zaprezentowano również możliwości opracowanego programu KZW symulacji współpracy jednostronnej kół zębatach do oceny kinematycznej zarysów ewolwentowych.

Abstract

In the article, the complex measuring process of the gears which enables cinematic cooperation of the gear pairs, has been described. The single flank searching position constructed and tested out in the Division of Metrology and Measuring Systems at Poznan University of Technology, has been presented. Also the possibilities of the proposed program simulating single flank measurement in the cinematic measurement of the gears.

Słowa kluczowe: pomiar kół zębatach, stanowisko badawcze, symulacja cyfrowa współpracy jednostronnej, dokładność kinematyczna

Keywords: measuring of the gears, searching position, single flank digital simulating, cinematic accuracy

1. Wprowadzenie

Ocenę jakości wykonania koła zębatach można przeprowadzić dokonując pomiaru i analizy wybranych odchyłek elementarnych np.: odchyłek podziałki czołowej, odchyłek podziałki przyporu, odchyłek zarysu zęba, odchyłek grubości zęba, bicia uzębienia itp. jak również metodą kompleksową polegającą na badaniu współpracy koła kontrolnego z kołem badanym.

Znane są dwie metody badania współpracy tzw. metoda współpracy jednostronnej i metoda współpracy obustronnej. Metoda współpracy obustronnej jest w Polsce stosunkowo dobrze rozpowszechniona. Polega na pomiarze zmian odległości osi dwóch współpracujących kół. Współpraca odbywa się przy zerowym luzie bocznym (zęby kół stykają się obydwojoma bokami). Trudności w interpretacji wyników pomiaru uzyskanych tą metodą są jej zasadniczym mankamentem. Stosowanie tej metody podyktowane jest brakiem aparatury do pomiaru kół zębatach metodą współpracy jednostronnej. Metoda współpracy jednostronnej określa dokładność kinematyczną koła

zębatego. Zasada wyznaczania funkcji odchylenia kinematycznego polega na porównaniu kątów obrotu koła kontrolnego i badanego przy uwzględnieniu przełożenia (i) współpracujących kół. Metoda kompleksowa daje możliwość oceny dokładności przenoszenia ruchu i płynności pracy [1, 2, 3, 4].

W dalszej części artykułu omawiana jest metoda kompleksowa - badania współpracy jednostronnej koła kontrolnego z kołem badanym, podczas której geometryczne warunki współpracy są zgodne z normalnymi warunkami współpracy w rzeczywistej przekładni zębatach.

Pomiar kół zębatach tą metodą można dokonywać na specjalistycznych maszynach do badania współpracy jednostronnej lub stosując opracowany w ZMiSP program symulacji cyfrowej takiej współpracy. Jedną z przyczyn ograniczających stosowanie specjalistycznych maszyn pomiarowych jest wysoki ich koszt.

2. Uwarunkowania wyboru pomiaru dokładności wykonania kół zębatach

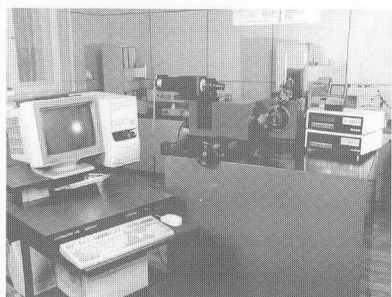
Pomiar kół zębatach można podzielić, przyjmując za kryterium rodzaj mierzonych odchyłek, na elementarne i kompleksowe. Metody elementarne to takie, których celem jest określenie wartości pojedynczych odchyłek geometrycznych. Metody kompleksowe to takie, które pozwalają na pomiar wartości parametrów, zależnych od szeregu pojedynczych odchyłek geometrycznych, dające możliwość określenia dokładności kinematycznej. Wybór metody uwarunkowany jest celem procesu pomiarowego oraz możliwościami technicznymi [1, 2, 6, 7, 10].

Pomiar pojedynczych odchyłek geometrycznych w trakcie procesu technologicznego, pozwala na korektę dokładności wykonywanych kół, bądź też eliminację takich, które nie spełniają wymagań narzuconych przez konstruktora. Na podstawie wartości pojedynczych odchyłek geometrycznych można również wnioskować o procesie zazębienia współpracujących ze sobą kół zębatach. Proces wnioskowania jest jednak wyjątkowo skomplikowany i niezbyt precyzyjny. Spowodowane jest to wzajemnymi interakcjami poszczególnych odchyłek oraz losowym ich zestawieniem podczas współpracy poszczególnych zarysów [1, 2].

Pomiar metodą kompleksową (współpraca koła badanego z kołem kontrolnym - pomiar na maszynie do badania takiej współpracy lub komputerowa symulacja współpracy) pozwala wyznaczyć przebieg odchylenia kinematycznego koła badanego posiadającego dowolną kombinację niezależnych odchyłek wykonawczych współpracującego z kołem kontrolnym.

3. Charakterystyka stanowiska badawczego od oceny dokładności kinematycznej ząbów ewolwentowych

W ZMiSP Politechniki Poznańskiej zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze (rys. 1) do oceny kinematycznej kół zębatach metodą współpracy jednostronnej [5, 6, 7].



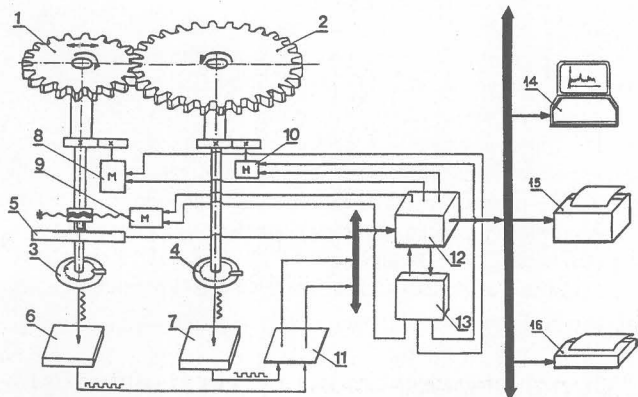
Rys. 1. Stanowisko badawcze do pomiaru kół zębatach metodą współpracy jednostronnej

Fig. 1. Searching position to single flank measurement of the gears

Stanowisko badawcze do oceny kinematycznej kół zębatach metodą współpracy jednostronnej konstrukcji ZMiSP składa się z następujących zespołów:

- bloku koła kontrolnego, z inkrementalnym przetwornikiem kąta obrotu - blok może wykonywać ruch w dwóch kierunkach - równoległym i prostopadłym do osi koła,
- bloku koła badanego z inkrementalnym przetwornikiem kąta obrotu - blok może wykonywać ruch w kierunku równoległym do osi koła i ruch skrętny w osi pionowej,
- korpusu maszyny pomiarowej z przetwornikiem liniowym,
- systemu komputerowego z monitorem, drukarką i ploterem.

Schemat działania stanowiska badawczego od oceny dokładności kinematycznej ząbów ewolwentowych przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Schemat działania stanowiska badawczego do oceny kinematycznej ząbów ewolwentowych: 1 - koło kontrolne, 2 - koło badane, 3, 4 - inkrementalne przetworniki obrotowe kąta, 5 - inkrementalny przetwornik liniowy, 6, 7 - interpolatory, 8, 9 - układ napędowy, 10 - układ hamowania, 11 - przetwornik A/C, 12 - system komputerowy, 13 - pulpitu sterowania, 14 - monitor, 15 - drukarka, 16 - ploter

Fig. 2. Schematic diagram of the searching position in the cinematic measurement of the gears: 1 - check gear, 2 - tested gear, 3, 4 - incremental rotary converter, 5 - incremental line converter, 6, 7 - interpolators, 8, 9 - drive systems, 10 - brake, 11 - A/C converter, 12 - computer system, 13 - control keyboard, 14 - monitor, 15 - printer, 16 - plotter

Opracowane stanowisko badawcze posiada system sterowania. Część funkcji kontrolowana jest przy pomocy układu mikroprocesorowego, a część sterowana przez operatora z poziomu pulpitu sterowania. Sygnały pomiarowe generowane są przez obrotowe przetworniki inkrementalne (3 i 4) firmy Heidenhain o handlowym symbolu ROD-800. Dokładność zastosowanych przetworników wynosi $\pm 1''$, a stopień dyskretyzacji $0,36''$. Zapewnione jest to dzięki tarczy kodowej podzielonej na 36000 transmitujących i nietransmitujących światło sektorów, przetworzeniu sygnałów w taki sposób, by czterokrotnie zwiększyć rozdzielczość, a wreszcie dodatkowemu interpolatorowi (6, 7). Inkrementalne przetworniki kąta są połączone z kołem kontrolnym i kołem badanym przez sprzęgło membranowe.

Sygnały z interpolatorów (dzielone elektronicznie na 25 części) przekazywane są do karty A/C (11), której liczniki pozwalają określić liczbowo wartość położenia poszczególnych osi. Tak przetworzone sygnały pomiarowe rejestrowane są w pamięci masowej systemu komputerowego (12). Do odczytu kąta ustawienia bloku koła badanego w stosunku do bloku koła kontrolnego zastosowano przetwornik ROC 415 (4) f. Heidenhain (dokładność $\pm 5''$ - możliwość ustawienia kąta między osiami koła kontrolnego i badanego od 90° do 180°). Komputer IBM PC pełni rolę jednostki centralnej odpowiedzialnej za wspomaganie procesu pomiarowego oraz analizę wyników pomiaru. Koło kontrolne otrzymuje napęd z silnika prądu stałego (8). Zakres bezstopniowej regulacji prędkości obrotowej koła kontrolnego wynosi: $0,5 \pm 24$ obrotów na minutę.

Wyniki pomiarów: przebieg odchylenia kinematycznego i jego widmo, przebieg odchylenia dynamicznego oraz wskaźniki charakteryzujące odchylenie kinematyczne i dynamiczne wyświetlane są na monitorze (14), mogą być wydrukowane na drukarce (15), a przebiegi wykreślone na ploterze (16).

Stanowisko badawcze do oceny kinematycznej kół zębatach metodą współpracy jednostronnej charakteryzuje się następującymi parametrami:

- kąt zawarty między osiami kół od 90° do 180° ,
- zakres średnicy pomiarowej $d=(50 \pm 350)$ mm,
- zakres modułów $m=(1 \pm 10)$ mm,
- szerokość wieńca $b \leq 40$ mm,
- dokładność wykonania koła: klasa 4-9,
- średnica wewnętrzna otworu kół zębatach $d=(20 \pm 100)$ mm.

Na skalę przemysłową tego typu maszyny do pomiaru kół zębatach metodą współpracy jednostronnej produkują dwie firmy: Klingelnberg w Niemczech oraz Gleason w USA.

Jedną z przyczyn ograniczających stosowanie takich specjalistycznych maszyn pomiarowych do badania współpracy jednostronnej jest wysoki koszt i konieczność stosowania kół kontrolnych. Błąd koła kontrolnego oraz dokładność toru pomiarowego maszyny mają wpływ na ostateczny błąd pomiaru współpracy.

4. Program symulacji do oceny dokładności kinematycznej ząbów ewolwentowych

4.1. Charakterystyka programu KZW

Opracowany program symulacji cyfrowej współpracy jednostronnej KZW przez ZMiSP pozwala wyznaczyć przebieg odchylenia kinematycznego koła badanego posiadającego dowolną kombinację niezależnych odchyłek wykonawczych współpracującego z kołem kontrolnym.

Przy opracowywaniu programu zastosowano model matematyczny współpracy jednostronnej i algorytm zaprezentowany szczegółowo w publikacjach [1, 2, 4, 8]. Praktyczna realizacja algorytmu została przygotowana na komputer IBM PC.

Program przygotowany jest do wykorzystania w dwóch wariantach:

Wariant 1 - umożliwia wyznaczenie funkcji odchylenia kinematycznego koła dla znanych odchyłek geometrycznych.

Wariant 2 - umożliwia generowanie losowo dowolnej kombinacji odchyłek geometrycznych i dla tej kombinacji wyznaczenie odchylenia kinematycznego.

W wyniku badania kół zębatach przy zastosowaniu programu - KZW wyznacza się:

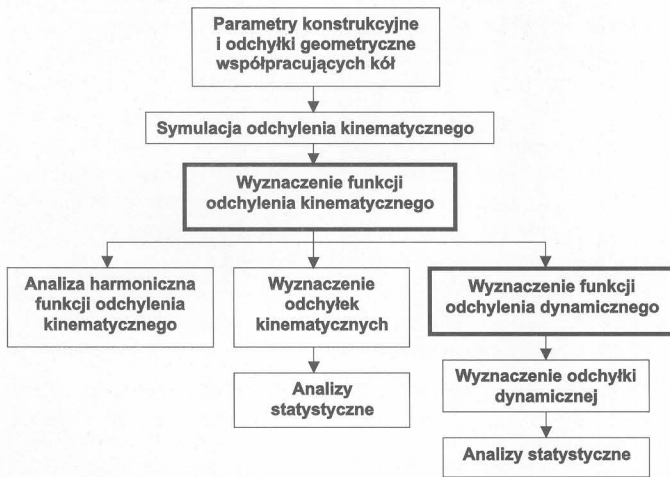
- przebieg odchylenia kinematycznego i odchyłkę kinematyczną,
- przebieg odchylenia dynamicznego i odchyłkę dynamiczną,

przeprowadza się:

- analizę harmoniczną odchylenia kinematycznego i analizy statystyczne.

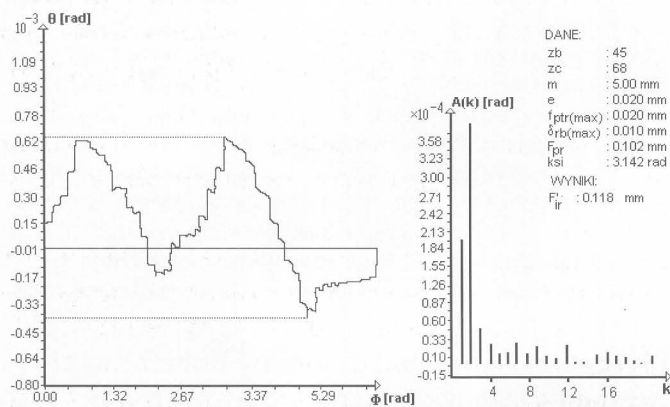
Można także dokonywać analizy odchylenia kinematycznego w obrębie współpracy jednego zęba. Blokowo przedstawia to rys. 3.

Przykładowy przebieg funkcji symulacji cyfrowej odchylenia kinematycznego $\Theta=f(\phi)$ z analizą w obrębie jednego zęba przedstawia rys. 4.



Rys. 3. Możliwości programu KZW symulacji cyfrowej do oceny kinematycznej ząbów ewolwentowych metodą współpracy jednostronnej

Fig. 3. Possibilities of the proposed program simulating single flank measurement in the cinematic measurement of the gears



Rys. 4. Przebieg funkcji odchylenia kinematycznego $\Theta=f(\phi)$ koła zębatego oraz jego analiza harmoniczna

Fig. 4. The example course of kinematic deviation function $\Theta=f(\phi)$ and its amplitude spectrum

4.2. Możliwości wykorzystania programu KZW symulacji cyfrowej do oceny kinematycznej ząbów ewolwentowych

Program komputerowy może być zastosowany z powodzeniem do diagnozowania kół i przekładni zębatych. Umożliwia pokazanie wpływu poszczególnych odchyłek oraz ich superpozycji na odchylenie kinematyczne i dynamiczne. Daje to obiektywną ocenę jakości koła zębatego pod względem przenoszenia ruchu. Z tych względów może być wykorzystany w różnych etapach procesu produkcyjnego przez:

- konstruktorów (umożliwia optymalizację doboru dokładności kół zębatych),
- technologów (umożliwia wybór optymalnego wariantu procesu technologicznego, doboru obrabiarek, narzędzi skrawających i oprządkowania - nośników dokładności),
- metrologów (umożliwia podjęcie decyzji co do kwalifikacji koła zębatego, pozwala określić przebieg odchylenia kinematycznego i dynamicznego dla znanych niezależnych odchyłek elementarnych otrzymanych np. z specjalistycznych maszyn pomiarowych do kół zębatych lub współrzędnościowych maszyn pomiarowych - dzięki temu można uniknąć konieczności zakupu specjalistycznych maszyn do pomiaru kół zębatych metodą współpracy jednostronnej),

- w montażu (umożliwia właściwy dobór współpracujących kół zębatych, celem optymalnego montażu ich w skrzyni przekładniowej).

Program może być wykorzystany do procedury samowzorcowania maszyny ZMiSP do oceny dokładności kinematycznej kół zębatych metodą współpracy jednostronnej. Koło kontrolne stosowane w metodzie badania współpracy jednostronnej powinno być dobrane w taki sposób, aby jego wpływ na dokładność procesu ząbienia był pomijalny. Spełnienie tego warunku jest praktycznie niemożliwe. W związku z tym ustalono wartości wpływu dokładności wykonania koła kontrolnego na wynik pomiaru po to aby wyeliminować go w formie poprawki. Opracowana koncepcja kół kontrolnych eliminuje te niedogodności, ponieważ maszyna jest samowzorcująca. Polega ona na wprowadzeniu do procesu pomiarowego parametrów geometrycznych kół kontrolnych. Dzięki opracowanemu programowi analizy wyników pomiaru, następuje automatyczna eliminacja składowej systematycznej generowanej przez koło kontrolne. Procedura samowzorcowania polega na pomiarach parametrów geometrycznych koła kontrolnego, które mogą być realizowane za pomocą specjalizowanych maszyn pomiarowych, np. firmy Klinegelnberg, czy Zeiss. Podczas pomiaru na tego typu maszynach sygnał pomiarowy zostaje przekazany do komputera maszyny pomiarowej. Wyniki pomiarów zostają zapisane na nośniku magnetycznym i wprowadzone do pamięci jednostki sterująco-obliczeniowej maszyny do pomiaru metodą do współpracy jednostronnej. Program dokonuje konwersji wprowadzonych danych i zapisanie ich w bibliotece danych geometrycznych kół kontrolnych. Operator maszyny pomiarowej wprowadza dane do procedury pomiarowej poprzez podanie odpowiednich identyfikatorów dla kół kontrolnych. Program komputerowy eliminuje wynik pomiaru poprzez eliminację wpływu odchyłek wykonawczych koła kontrolnego.

Program może być również wykorzystany do diagnostyki łańcuchów kinematycznych w maszynach technologicznych, co ma duże znaczenie praktyczne. Wyniki pomiaru pozwalają na jednoznaczną ocenę właściwości użytkowych współpracujących kół lub całych układów kinematycznych zdefiniowanych przez ich dokładność geometryczną. Parametrami pomiaru są kąty obrotu współpracujących kół dla przekładni jednostopniowej lub kąty obrotu wału napędzanego i napędzającego dla całego łańcucha kinematycznego maszyny technologicznej. Wynikiem pomiaru jest odchylenie kinematyczne zdefiniowane jako różnica rzeczywistego i nominalnego kąta obrotu na wejściu i wyjściu przekładni.

5. Ocena właściwości kół zębatych metodą badania współpracy

5.1. Analiza odchylenia kinematycznego

Przebieg odchylenia kinematycznego w funkcji kąta obrotu analizowanego koła (porównanie kątów obrotu koła badanego z kołem kontrolnym przy uwzględnieniu przełożenia i) umożliwia określenie odchyłki kinematycznej koła F_{ir} i odchyłki kinematycznej koła na podziałce f_{ir} . Odchyłki te zawierają informację o płynności pracy koła i o dokładności kinematycznej. Odchyłka podziałki obwodowej, podobnie jak odchyłka promienia zasadniczego, wywołują zmiany przebiegu odchylenia kinematycznego mające wpływ na płynność pracy przekładni. Sumaryczna odchyłka podziałek, mimośrodkowość osi obrotu, kąt przesunięcia fazowego mają wpływ na dokładność kinematyczną koła zębatego.

5.2. Analiza harmoniczna odchylenia kinematycznego

W celu uzyskania dalszych informacji o zachowaniu się kół podczas pracy rzeczywistej przekładni pod względem dokładności przenoszenia ruchu, głośności pracy, drgań przeprowadza się analizę harmoniczną odchylenia kinematycznego $\Theta=f(\phi)$. W badaniach przy

sporządzaniu analizy widmowej wykorzystano metody dyskretnej transformacji Fouriera. Zastosowany algorytm do obliczania szybkiej transformacji Fouriera (FFT) przebiegu $\Theta=f(\phi)$ pozwala na przekształcenie informacji z postaci czasowej na częstotliwościową w czasie bliskim czasu rzeczywistemu (jest to pakiet oprogramowania stosowany jako standard do programu prezentowanej symulacji współpracy jednostronnej). Dla pełnej oceny zachowania się kół zębatych podczas pracy w przekładni, oprócz określenia odchyłek elementarnych takich jak odchyłek podziałek, odchyłek kąta zarysu, bicia uzębienia itp., oraz odchyłek związanych badaniem współpracy: odchyłki kinematycznej koła, odchyłki kinematycznej koła na podziałce, należy znać ich rozkład. Analiza harmoniczna daje możliwości rozwiązania tego problemu. Ukazuje różne widma prążkowe w zależności od wartości i rozkładu odchyłek na kole zębatym. Z widma można określić wartość amplitudy dla poszczególnych harmonicznych „k”.

5.3. Analiza odchylenia dynamicznego

Opracowany algorytm obliczeniowy pozwala na wyznaczenie dodatkowych parametrów takich jak odchylenie dynamiczne, odchyłka dynamiczna [3]. Uzyskuje się w ten sposób dodatkowe informacje o źródłach i charakterze występujących błędów badanego koła. Dotychczasowa procedura wyznaczania nadwyżki dynamicznej uwzględnia tylko odchyłkę podziałki obwodowej, podczas gdy na dynamikę procesu ząbienia wpływają w istotny sposób również inne odchyłki geometryczne. Analiza odchylenia dynamicznego i odchyłki dynamicznej uwzględniająca wszystkie występujące odchyłki wyznaczone za pomocą opracowanego pakietu oprogramowania, pozwala na optymalizację konstrukcji koła zębatego.

6. Pomiar kompleksowy kół zębatych na współrzędnościowych maszynach pomiarowych

Obecnie w pomiarach wielkości geometrycznych, dotyczących elementów maszynowych, zaczyna dominować współrzędnościowa technika pomiarowa [9]. Umożliwia ona wyznaczanie wymiarów, przestrzennie ukształtowanych części maszyn z dużą dokładnością. Rozwój konstrukcji maszyn współrzędnościowych a szczególnie ich oprogramowania umożliwił zastosowanie ich do pomiaru tak złożonego w sensie geometrycznym elementu jak koło zębate. Współrzędnościowe maszyny pomiarowe coraz częściej wypierają uniwersalne narzędzia pomiarowe oraz specjalistyczne maszyny.

Pomiary kół zębatych przy pomocy techniki współrzędnościowej są nieomal nieograniczone. Jedynie zastrzeżenia budzi występująca swego rodzaju sprzeczność, pomiędzy bardzo szerokim spektrum możliwości prezentowanych przez producentów maszyn współrzędnościowych a oczekiwaniami producentów kół zębatych, którzy nie zadawalają się poznaniem pojedynczych odchyłek geometrycznych koła zębatego. Producenci kół zębatych chcieliby poznać ich własności eksploatacyjne wyrażone przez parametry charakteryzujące funkcję odchylenia kinematycznego. Lukę tę uzupełnia oprogramowanie KZW opracowane w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych.

7. Wnioski

- Poznanie zależności między dokładnością kinematyczną a dokładnością geometryczną umożliwia opracowanie metodyki interpretacji wyników pomiaru kół zębatych, uzyskanych metodą współpracy jednostronnej.
- Opracowany program komputerowy symulacji cyfrowej współpracy jednostronnej może być zastosowany do diagnozowania kół i przekładni zębatych. Umożliwia pokazanie wpływu poszczególnych odchyłek oraz ich superpozycji na odchylenie kinematyczne i dynamiczne. Daje to obiektywną ocenę jakości koła zębatego pod względem przenoszenia ruchu.

- Program symulacji cyfrowej współpracy jednostronnej może być również wykorzystany w różnych etapach procesu produkcyjnego: na etapie projektowania, technologii, kontroli i montażu. Program ten może być wykorzystany także do wyznaczania odchylenia kinematycznego dla znanych niezależnych odchyłek elementarnych otrzymanych np. z specjalistycznych maszyn pomiarowych do kół zębatych lub współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Dzięki temu można uniknąć konieczności zakupu specjalistycznych maszyn do pomiaru kół zębatych metodą współpracy jednostronnej.
- Dzięki możliwości zastosowania samowzorcowania w maszynie do badania kół zębatych metoda współpracy jednostronnej wyeliminowano ograniczenia zakresu pomiarowego wynikające z dokładności kół kontrolnych.
- Znając przebiegi funkcji odchylenia kinematycznych można przeprowadzać dalsze ich analizy takie jak: analizy odchylenia dynamicznego, analizy harmoniczne, analizy statystyczne.

Literatura

- [1] Chajda J., Woliński W.: Możliwości charakteryzowania odchylenia kinematycznego kół zębatych za pomocą wybranych odchyłek geometrycznych. *Archiwum Technologii Budowy Maszyn, Prace PAN, zeszyt 10, Poznań 1992*
- [2] Chajda J., Gazdecki A., Woliński W.: Dokładność i możliwości pomiaru odchylenia kinematycznego metodą współpracy jednostronnej. *Prace Sekcji Podstaw Metrologii Komitetu Budowy Maszyn PAN, zeszyt nr 48, Poznań 1992*
- [3] Chajda J., Woliński W.: Nowa metoda oceny właściwości dynamicznych kół zębatych; *Archiwum Technologii Budowy Maszyn. Prace PAN, zeszyt 11, Poznań 1993*
- [4] Chajda J., Gazdecki A., Woliński W.: Model ząbienia zarysów ewolwentowych jako integralny element procesu pomiarowego kół zębatych. *Materiały Międzynarodowej Konferencji „Koła zębate. Wytwarzanie i eksploatacja przekładni zębatych”. Poznań 1993*
- [5] Chajda J., Gazdecki A.: „An „intelligent” machine for single flank gear-teasting”. *International Congress - Gear Transmissions. Sofia, 1995*
- [6] Chajda J., Woliński W.: „A new approach to single flank gear testing”. *International Congress - Gear Transmissions. Sofia, 1995*
- [7] Chajda J., Gazdecki A., Woliński W.: The conception of the intelligent gear quality diagnosis system. *Materiały 6. Internationales DAAAM Symposium, Kraków, 1995*
- [8] Chajda J., Gazdecki A.: Możliwości diagnozowania kół zębatych na podstawie pomiaru elementarnych odchyłek i symulacji cyfrowej współpracy jednostronnej. *Krajowy Kongres Metrologii, Gdańsk 1998, tom 5*
- [9] Gravel G.: Analysis of gear measurement. A new tool to determine the influences on tooth deviation. *IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa Współrzędnościowa Technika Pomiarowa, Budowa i Eksploatacja Maszyn, Zeszyt 53, Bielsko-Biała 2000*
- [10] Litvin F.L., Zhang Y., Kieffer J., Handschuh R.F.: Identification and minimization of deviations of real gear tooth surfaces. *American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division Publication DE. V. 19, Computer-Aided and Computational Design, Advances in Design Automation - 1989, Sep. 17-21, Montreal 1989, Que, Canada*

Title: The Analysis of Gears Manufacturing Accuracy with the Use of Single Flank Digital Simulation