

Mirosław GRZELKAPOLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ,
ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH**Współrzędnościowe pomiary kół zębatach walcowych****Dr inż. Mirosław GRZELKA**

Ukończył studia wyższe na Wydziale Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej w 1997 roku, a w 2004 roku obronił pracę doktorską na tym samym wydziale. Dorobek naukowy to ponad 40 publikacji na krajowych i zagranicznych konferencjach naukowych. Zainteresowania badawcze związane są z pomiarami wielkości geometrycznych z wykorzystaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej. Problematyka badań dotyczy pomiarów kół zębatach oraz nietypowych, krzywoliniowych elementów o złożonych kształtach jak również reverse engineering i szeroko rozumianej dokładności pomiarów. Laureat nagrody naukowej IV Wydziału Nauk Technicznych PAN w kadencji 2003-2006, za pracę doktorską z zakresu metrologii.



e-mail: Mirosław.Grzelka@put.poznan.pl

Streszczenie

Kołem zębatach, jako elementom odpowiedzialnym za przenoszenie ruchu, stawiane są coraz większe wymagania dotyczące ich dokładności wykonania. Przemysł samochodowy i lotniczy oprócz wymogów dokładności geometrycznej stawia warunki na dokładność kinematyczną a w najbliższej perspektywie dynamiczną. Prace prowadzone w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych dotyczą zarówno analizy dokładności pomiarów geometrycznych kół zębatach, jak również odchylenia kinematycznego i dynamicznego przekładni zębatach. W artykule przedstawiono szczegółową analizę dokładności pomiarów współrzędnościowych kół zębatach wraz z porównaniem z pomiarami na specjalizowanych maszynach pomiarowych do kół zębatach. Na podstawie przeprowadzonych badań, analiz i symulacji przedstawiono ogólną postać błędów pomiarów współrzędnościowych i przedstawiono wytyczne dotyczące możliwości zastosowania odpowiedniej klasy maszyn współrzędnościowych do pomiaru kół zębatach walcowych wykonanych w określonych klasach dokładności.

Słowa kluczowe: koła zębata, technika współrzędnościowa, dokładność pomiarów, korekta współrzędnych

Coordinate measurement of gears**Abstract**

The gears are responsible for transmission of movement, and their accuracy requirements are going higher. The motor and plane industry apart of geometrical accuracy emphasizes conditions on the cinematic accuracy, and in close perspective on the dynamic accuracy. The researches of the Division of Metrology and Measurement System are directed not only towards the higher accuracy of gears geometry measurement, but also towards the measurement of cinematic and dynamic deviations. In the paper, the detailed analysis of the accuracy of coordinate measurement of gears compared with the measurement using specialized gears measurement devices have been carried out. The performed researches and analysis led to the general conclusions on the coordinate gears measurement inaccuracy. The recommendations on the application of appropriate coordinate measuring machine accuracy class for the measurement of cylindrical gears with particular tolerance, have been presented, too.

Keywords: gears, Coordinate Measuring Technique, accuracy of measurement, correction of coordinates

Dokładna ocena metrologiczna stworzonego programu pomiarowego pozwala na wyznaczenie błędów pomiaru kół zębatach na WMP i wytycznych doboru narzędzia pomiarowego, którym jest WMP o znanej niepewności pomiaru, do zadania pomiarowego, czyli pomiaru koła zębatach wykonanego w danej klasie dokładności. Kryterium poprawności metrologicznej pomiaru zakłada, że dopuszczalny błąd pomiaru nie może przekroczyć 10% dopuszczalnej tolerancji. Do przeprowadzenia całościowej metrologicznej oceny dokładności

współrzędnościowych pomiarów kół zębatach na bazie opracowanego programu pomiarowego konieczne było wykonanie szeregu symulacji pozwalających na wyznaczenie wartości poszczególnych błędów oraz ich wpływu na wartości wielkości mierzonych. Polegała ona na:

- analizie wszystkich błędów występujących w procesie pomiarowym,
- analizie wpływu poszczególnych błędów na odchyłki wyznaczone podczas pomiaru,
- wyznaczeniu zależności opisujących poszczególne błędy,
- wyznaczeniu niepewności oceny dokładności wykonania kół zębatach.

2. Dokładność wyznaczenia poszczególnych odchyłek badanego koła zębatach

Dokładność wyznaczenia poszczególnych odchyłek badanego koła zębatach opisuje równanie:

$$\Delta() = \Delta_{x0,y0} + \Delta_{poz} + \Delta_{kor}, \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta()$ – błąd wyznaczenia poszczególnych odchyłek koła zębatach (zarysu ewolwentowego, promienia zasadniczego, grubości zęba, podziałek, linii zęba, bicia),

$\Delta_{x0,y0}$ – błąd wyznaczenia współrzędnych środka układu współrzędnych (błąd układu współrzędnych),

Δ_{poz} – błąd pozycjonowania końcówki pomiarowej do najazdu na punkty pomiarowe,

Δ_{kor} – błąd korekt zastosowanych w algorytmie.

Jako kryterium oceny przyjęto zasadę metrologicznie poprawnego pomiaru: maksymalny dopuszczalny błąd pomiaru danej wielkości nie może przekraczać 0,1 dopuszczalnej tolerancji (0,1T) dla danej klasy dokładności.

2.1. Błąd wyznaczenia środka układu współrzędnych

$$\Delta_{x0,y0} = f(N_{\text{pkt pom}}, E, \Delta_{\text{kształtu}}), \quad (2)$$

gdzie:

$N_{\text{pkt pom}}$ – liczba punktów pomiarowych równomiernie rozłożonych na obwodzie okręgu mierzonego,

$E(MPE_E; U_3)$ – niepewność WMP,

$\Delta_{\text{kształtu}}$ – błędy kształtu, owal i trójgraniastość, jako odchyłki najczęściej występujące i najbardziej niekorzystnie wpływające na wyznaczenie współrzędnych środka okręgu.

Układ współrzędnych mierzonego koła zębatach tworzony jest na charakterystycznych elementach geometrycznych koła. W procesie technologicznym zęby koła nacinane są względem otworu/walca ustalającego, czyli względem rzeczywistej osi obrotu koła. Dlatego w procesie pomiaru elementem, na którym

ustawienie układu współrzędnych będzie metrologicznie poprawne, powinien być ten sam element.

Kierunek osi z układu współrzędnych wyznaczany jest poprzez pomiar trzech okręgów na różnych wysokościach otworu/walca ustalającego. Obliczenie współrzędnych środków każdego z okręgów i stworzenie z nich prostej przestrzennej (3D) pozwala na przyporządkowanie jej jako kierunku normalny do płaszczyzny głównej układu współrzędnych koła (oś z).

Wyznaczenie z jak najmniejszym błędem współrzędnych poszczególnych okręgów warunkuje dokładne określenie początku układu współrzędnych. Błędy popełnione w tym procesie będą obarczały swoją wartością wszystkie wielkości mierzone.

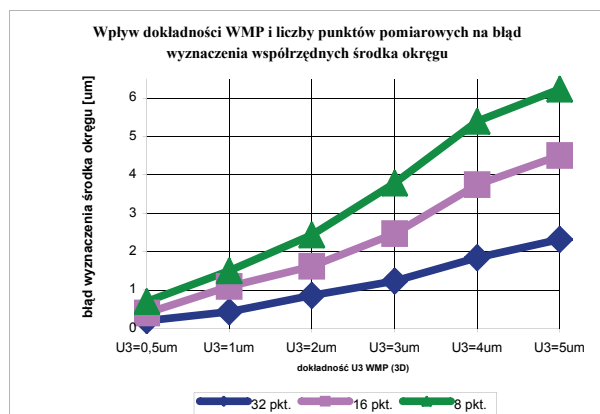
Przeprowadzono szereg symulacji pomiaru okręgu i określenia współrzędnych jego środka pod kątem oceny dokładności jego wyznaczenia. Symulowano odchyłki okrągłości oraz niepewność pomiaru WMP i przyjęto założenia:

- dokładność WMP - $MPE_E(E)$ o wartości podanej przez producenta,
- pole tolerancji okręgu odpowiadające klasie 5, 6, 7 i 8 dokładności wykonania,
- odchyłki kształtu: owal i trójgraniastość jako najbardziej niekorzystne, o różnej wadze wpływu; przeprowadzone symulacje potwierdziły, że najbardziej niekorzystnym przypadkiem jest wystąpienie owalu i trójgraniastości o tej samej wadze wpływu, powoduje to odchyłkę kształtu o największej wartości,
- przypadkowy rozkład błędów pochodzącego od WMP i głowicy pomiarowej,
- suma wszystkich błędów założonych i symulowanych nie przekracza wartości tolerancji dla założonej klasy dokładności wykonania symulowanego okręgu, co oznacza, że rozpatrywany okrąg jest wykonany zgodnie z założoną klasą dokładności.

Symulacje przeprowadzono dla okręgów o promieniach 10÷250mm oraz dla tolerancji H/h dla 5÷8 klasy dokładności wykonania. Współrzędne ich środków wyznaczane były dla różnej liczby punktów pomiarowych równomiernie rozłożonych na obwodzie okręgu i różnych niepewności WMP.

Tab. 1. Wpływ dokładności WMP i liczby punktów pomiarowych na błąd wyznaczenia współrzędnych środka okręgu
Tab.1. Influence of the CMM accuracy and number of measuring points on the error of circle center coordinates

E	0,5	1,0	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
Liczba punktów							
32	0,2	0,4	0,7	0,9	1,2	1,8	2,2
16	0,4	1,1	1,6	2,0	2,5	3,8	4,5
8	0,7	1,5	2,4	3,1	3,8	5,4	6,3



Rys. 1. Wpływ dokładności WMP i liczby punktów pomiarowych na błąd wyznaczenia współrzędnych środka okręgu
Fig. 1. Influence of the CMM accuracy and number of measuring points on the error of circle center coordinates

Dokładność wyznaczenia środka układu współrzędnych, przy założeniu, że jest on wykonany zgodnie z założoną dokładnością zależy od liczby punktów pomiarowych, niepewności WMP i rozkładu odchyłek kształtu (tab. 1, rys. 1).

Zmniejszenie liczby punktów pomiarowych do wyznaczenia środka okręgu i zastosowanie do pomiarów maszyny pomiarowej o większej niepewności pomiaru zwiększa błąd jego wyznaczenia. Błędy występujące w procesie wyznaczania układu współrzędnych warunkują możliwość zastosowania WMP o znanej niepewności pomiaru do pomiaru kół zębatych wykonanych w danej klasie dokładności zgodnie z wytycznymi normy DIN 3962 [4].

2.2. Błąd pozycjonowania końcówki pomiarowej

Δ_{poz} - niedokładność zebrania punktu pomiarowego, równa niepewności WMP.

$$\Delta_{poz} = MPE_E(E; U_3). \quad (3)$$

Błąd pozycjonowania końcówki pomiarowej w trakcie dokonywania pomiarów na WMP przyjęto jako równy $MPE_E(E; U_3)$, ponieważ w trakcie pomiarów występują ruchy we wszystkich kierunkach (wszystkich osiach).

2.3. Błąd korekt

Δ_{kor} - błąd korekt (suma błędów korekty I i korekty II) zastosowanych w algorytmie

Dzięki opracowanym algorytmom pomiarowym zawierającym korekty zminimalizowano błędy identyfikacji punktów pomiarowych na powierzchni mierzonego koła zębatego. Błędy algorytmów nie przekraczają wartości $0,02\mu\text{m}$. Metrologicznie słuszne jest przyjęcie ich wartości równej zero ($\Delta_{kor} \cong 0$) w dalszej ocenie powstałego programu [3].

3. Błąd wyznaczenia poszczególnych odchyłek

Dokładność wyznaczenia poszczególnych odchyłek elementarnych zależy od niepewności WMP, liczby punktów pomiarowych przy wyznaczeniu środka układu współrzędnych oraz błędów kształtu otworu/walca ustalającego. Błędy pomiaru poszczególnych wielkości koła zębatego przedstawiono w tab. 2.

Tab. 2. Dokładność wyznaczenia poszczególnych odchyłek badanego koła zębatego
Tab. 2. Accuracy of the determination of particular deviations of gear

$MPE_E(E; U_3)$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
Liczba punktów							
32	0,7	1,4	2,1	2,7	3,4	4,2	5,8
16	0,9	2,1	2,9	3,6	4,5	5,5	7,8
8	1,2	2,5	3,3	4,4	5,6	6,8	9,4


4. Wytyczne doboru WMP do pomiaru koła zębatego


Na podstawie wyznaczonych błędów pomiaru poszczególnych wielkości charakteryzujących koło zębate na WMP sformułowano wytyczne dotyczące metrologicznie poprawnego doboru narzędzia pomiarowego (WMP) do zadania pomiarowego (pomiar koła zębatego wykonanego w danej klasie dokładności wykonania). W tabeli 3 zawarto wytyczne doboru

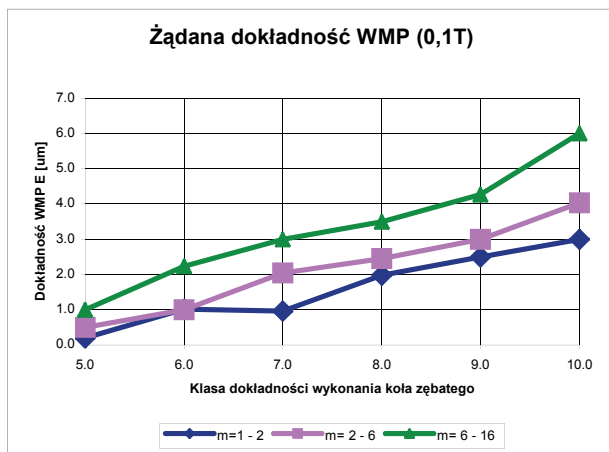
WMP dla kryterium doboru 0,1T w zależności do klasy dokładności wykonania koła zębatego. Na WMP o niepewności $\pm 1,5\mu\text{m}$ można przy użyciu opracowanego programu pomiarowego dokonać pomiaru kół zębatach wykonanych w 8 klasie dokładności o modułach $1\div 2$, 7 klasie o modułach $2\div 6$, 6 klasie o modułach $6\div 10$ oraz 5 klasie o modułach powyżej 10.

Tab. 3. Dokładność WMP [μm] dla pomiaru koła zębatego według kryterium 0,1T
Tab. 3. CMM accuracy for the gear measurement according criterion 0.1T

Klasa dokładności	moduł (powyżej - do)				
	1 ÷ 2	2 ÷ 3,55	3,55 ÷ 6	6 ÷ 10	10 ÷ 16
5	0,3	0,5	0,5	1,0	2,0
6	1,0	1,0	1,0	2,0	2,5
7	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0
8	2,0	2,5	2,5	3,5	3,5
9	2,5	3,0	3,0	4,0	4,5
10	3,0	4,0	4,0	7,0	10,0

 - maszyna o niepewności pomiaru $MPEE=0,3\mu\text{m}$

 - WMP o dużej dokładności pomiarowej



Rys. 2. Dokładność WMP dla pomiaru koła zębatego według kryterium 0,1T
Fig. 2. CMM accuracy for the gear measurement according criterion 0.1T

5. Badania porównawcze

Weryfikacja programu pomiarowego do pomiaru kół zębatach walcowych o zębach prostych polegała na porównaniu wyników pomiaru kół zębatach na WMP z wykorzystaniem opracowanego programu pomiarowego z wynikami pomiaru na specjalistycznej maszynie do pomiaru kół zębatach.

Tab. 4. Wartości poszczególnych odchyłek dla koła zębatego [μm] o module 2,5, liczbie zębów 27 wykonanym w 7, 8 i 9 klasie dokładności [μm]
Tab. 4. Particular deviations of the gear with module 2.5 and 27 teeth made in 7, 8 and 9th accuracy class

Klasa dokładności	Średnica podziałowa (mm)	f_f	f_{Ha}	R_s	f_p	F_r	F_p	$f_{\beta\beta}$	$f_{H\beta}$
7	50 – 120	11	9	16	10	28	36	18	17
8		16	12	22	14	40	50	22	21
9		22	18	32	20	56	71	30	26

5.1. Pomiar na WMP

Na WMP o niepewności pomiaru $MPE_E=\pm(1,5+L/333)$ zmierzono koło zębate o następujących parametrach geometrycznych: moduł 2,5, liczba zębów 27 i kąt zarysu 20° . W początkowym etapie weryfikacji nieznaną była klasa dokładności wykonania badanego koła. Określono ją na $7\div 9$ klasę, analizując proces technologiczny koła i jego przeznaczenie. Do oceny dokładności badanego koła zębatego, przyjęto wytyczne normy

DIN 3962. Ocenie poddano: zarys ewolwentowy, promień okręgu zasadniczego, grubości poszczególnych zębów, podziałki obwodowe, linię zęba i bicie.

Zarys ewolwentowy

Do oceny zarysu ewolwentowego wykorzystano wszystkie zarysy badanego koła zębatego (54 zarysy, z czego 27 lewych i 27 prawych). Wynikiem pomiarów zarysów ewolwentowych jest odchyłka zarysu wynosząca $12,9\mu\text{m}$. Odpowiada ona 8 klasie dokładności wykonania koła zębatego.

Promień okręgu zasadniczego

Zgodnie z algorytmami pomiarowym równocześnie z oceną zarysu przeprowadzono ocenę odchyłki promienia zasadniczego, czyli odchyłkę położenia zarysu, której wartość wyniosła $10,7\mu\text{m}$. Wynik pomiaru odpowiada wymaganiom 8 klasy dokładności.

Grubość zęba

Wyniki pomiaru grubości zęba, zgodnie z algorytmami opracowanego programu: maksymalna odchyłka grubości zęba wynosi $-1,8\mu\text{m}$, minimalna $-17,4\mu\text{m}$, a tolerancja wykonania $15,6\mu\text{m}$. Wyznaczone wartości odchyłek odpowiadają 8 klasie dokładności według wytycznych normy DIN.

Podziałki obwodowe

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczono podziałki prawe i lewe oraz ich odchyłki jak również odchyłkę sumaryczną podziałek. Dobór punktów do analizy podziałek przebiegał zgodnie z opracowanymi algorytmami. Maksymalna wartość odchyłki podziałek obwodowych wyniosła $13,7\mu\text{m}$, a minimalna $-13,9\mu\text{m}$, sumaryczna odchyłka podziałek $39,7\mu\text{m}$. Wyniki pomiaru pozwalają zakwalifikować badane koło zębate do 8 klasy dokładności wykonania.

Linia zęba

Pomiar linii zęba metodą dygitalizacji przeprowadzono po prostej wyznaczonej przez tworzącą walca podziałowego na boku zęba. Pomiarom poddano 12 linii zębów, odpowiednio 1, 5, 9, 13, 17 i 21 zęba na obu jego bokach. Odchyłka kształtu linii zęba wynosi $4,1\mu\text{m}$, a kąta linii zęba $3,6\mu\text{m}$, co odpowiada 3 klasie dokładności wykonania koła zębatego (wartości dopuszczalne przez normę dla klasy 3: $f_{f\beta} = 7\mu\text{m}$, $f_{H\beta} = 6,5\mu\text{m}$).

Bicie

Z punktów wykorzystywanych do wyznaczenia grubości zębów i podziałek wyznaczona została odchyłka bicia o wartości $7,4\mu\text{m}$ oraz kąt wektora mimośrodowości (połowa bicia) do osi y układu współrzędnych $\alpha_m = 36^\circ 24' 45''$. Odchyłka bicia badanego koła zębatego zawiera się w przedziale odpowiadającym 4 klasie dokładności (dopuszczalna wartość dla 4 klasy $F_r = 10\mu\text{m}$).

Na podstawie wyników pomiarów i wytycznych normy DIN 3962 badane koło zębate wykonano w 8 klasie dokładności. Zgodnie z wytycznymi (tabela 3), do pomiaru kół zębatach wykonanych w 8 klasie dokładności należy użyć WMP o niepewności nie większej niż $MPE_E=\pm 2,5\mu\text{m}$, gdzie błąd pomiaru poszczególnych wielkości wynosi $\pm 2,1\mu\text{m}$ (tabela 2). Maszyna pomiarowa, której użyto do pomiaru badanego koła zębatego, spełnia kryteria, zapewniając metrologiczną poprawność identyfikacji wielkości mierzonych.

Tab.5. Wyniki pomiarów koła zębatego na WMP [μm]

Tab. 5. Results of the gear measurement with CMM

Odchyłka	Sym bol	Wartość odchyłki	Błąd pomiaru odchyłek	Klasa dokładności wykonania
odchyłka zarysu ewolwentowego	$f_{f\alpha}$	12,9	$\pm 2,1\mu\text{m}$	8
odchyłka promienia zasadniczego	$f_{f\alpha}$	10,7		8
odchyłka grubości zęba	R_s	17,4		8
maksymalna odchyłka podziałek obwodowych	f_{pt}	13,9		8
sumaryczna odchyłka podziałki obwodowej	F_p	39,7		8
odchylenie od ruchu obrotowego - bicie	F_r	7,4		4
odchyłka kształtu linii zęba	$f_{f\beta}$	4,1		3
odchyłka kąta linii zęba	$f_{H\beta}$	3,6		3

5.2. Pomiar na specjalizowanej maszynie pomiarowej do kół zębatych

Dla potwierdzenia poprawności algorytmów zastosowanych w programie pomiarowym na WMP przeprowadzono alternatywne pomiary tego samego koła zębatego wykonanego w 8 klasie dokładności na specjalizowanej maszynie pomiarowej. Pomiary obejmowały: pomiar podziałek obwodowych lewych i prawych, pomiar zarysu ewolwentowego i linii zęba (pomiar wykonano na czterech zębach rozmieszczonych równomiernie na obwodzie koła) oraz bicie.

Niepewności pomiaru specjalizowanej maszyny pomiarowej podana przez producenta dla pomiaru zarysu ewolwentowego wynosi $\pm 1,5\mu\text{m}$ a dla linii zęba $\pm 2\mu\text{m}$. Zdefiniowana została zgodnie z wytycznymi normy DIN 1319 oraz w VDA/VDE 2617 i wynosi:

- dla pomiaru zarysu ewolwentowego:

$$U_{95} = \pm \left(0,8 + \frac{D}{167,6} \right), \quad (4)$$

- dla pomiaru linii zęba:

$$U_{95} = \pm \left(0,8 + \frac{D}{167,6} + \frac{b}{500} \right), \quad (5)$$

gdzie:

U_{95} – niepewność pomiaru [μm],

D – średnica koła podziałowego [mm],

b – szerokość zazębienia (szerokość wieńca) [mm].

Wyniki, które uzyskano, pozwalają na ocenę odchyłek poszczególnych parametrów badanego koła zębatego. Zamieszczono je w tabeli 6.

Tab. 6. Wyniki pomiarów koła zębatego na specjalizowanej maszynie pomiarowej

Tab. 6. Results of the gear measurement with specialized device for gears

Odchyłka	Symbol	Wartość odchyłki [μm]	Błąd wyznaczenia odchyłki	Klasa dokładności wykonania
odchyłka zarysu ewolwentowego	$ff\alpha$	9,9	$\pm 1,5$	8
odchyłka promienia zasadniczego	$fH\alpha$	7,1		8
sumaryczna odchyłka zarysu ewolwentowego	$F\alpha$	11,7		7
maksymalna odchyłka podziałek obwodowych	$f_{pt} \text{ max}$	12,1		8
sumaryczna odchyłka podziałki obwodowej	F_p	27,7		6
odchyłka rozpiętości podziałek	$F_{pz/8}$	13,4		8
odchylenie od ruchu obrotowego - bicie	F_r	6,5		4
odchyłka kształtu linii zęba	$ff\beta$	1,3		$\pm 2,0$
odchyłka kąta linii zęba	$fH\beta$	0,7	1	
sumaryczna odchyłka linii zęba	$F\beta$	1,3	1	

Na podstawie uzyskanych wyników można jednoznacznie stwierdzić, że badane koło zębate wykonane jest w 8 klasie dokładności zgodnie z wytycznymi normy DIN 3962, co potwierdzają wyniki pomiarów z wykorzystaniem WMP i opracowanego programu oraz alternatywne pomiary na specjalizowanej maszynie pomiarowej.

5.3. Wnioski z badań porównawczych

Weryfikacja programu pomiarowego kół zębatych na WMP potwierdziła jednoznaczność wyników pomiaru tego samego koła wykonanego w 8 klasie dokładności z wynikami alternatywnego pomiaru.

Na korzyść stosowania WMP wyposażonej dodatkowo w opracowany program pomiarowy kół zębatych, przemawia pełna jej uniwersalność.

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej oceny metrologicznej programu pomiarowego do kół zębatych na WMP określono wartości poszczególnych błędów i ich wpływ na błędy wielkości mierzonych i ich odchyłki. Błąd pomiaru koła zębatego na WMP jest uzależniony od niepewności WMP oraz błędu wyznaczenia układu współrzędnych. Wyznaczając układ współrzędnych zgodnie z przedstawioną metodyką minimalizuje się jego błąd. Wyznaczone błędy algorytmów i korekt zastosowanych w programie pozwalają uznać ich wartości jako nieistotne i nie wpływające na błąd pomiaru koła zębatego. Wyniki symulacji potwierdzają metrologiczną poprawność stworzonego programu pomiarowego i zawartych w nim algorytmów obliczeniowych.

Analiza błędów pomiaru kół zębatych pozwoliła na określenie wytycznych doboru odpowiedniej WMP o znanej niepewności pomiaru do pomiaru koła zębatego walcowego o zębach prostych wykonanego w danej klasie dokładności. Dobór WMP zgodnie z wytycznymi pozwala na metrologicznie poprawny pomiar oraz zidentyfikowanie poszczególnych wielkości geometrycznych i ich odchyłek.

Pomiar odchyłek wykonawczych koła zębatego bez metrologicznej oceny metody pomiaru, algorytmów i wyznaczenia błędów pomiaru oraz nieprawidłowy dobór przyrządu pomiarowego do zadania pomiarowego nie daje pełnej i poprawnej metrologicznie informacji o dokładności wykonania koła zębatego.

Wnioski zostały w pełni potwierdzone przez badania weryfikacyjne z użyciem maszyny specjalizowanej do pomiaru kół zębatych.

6. Literatura

- [1] Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Maszyny i roboty pomiarowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.
- [2] Chajda J., Grzelka M.: The Algorithm of the Gears Measurement with a CMM; XVI IMEKO World Congress, Wien-Vienna September 25-28, 2000, Proceedings Volume VIII, Topic 14 – Measurement of Geometrical Quantities, Topic 25 – Quality Management, s.51-56.
- [3] Grzelka M. Praca doktorska Ocena metrologiczna kompleksowych pomiarów dokładności wykonania kół zębatych z wykorzystaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej, Poznań 2003
- [4] DIN 3960 Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderraden) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung