

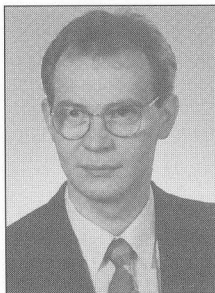
Mirosław GRZELKA

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

Dokładność pomiaru kół zębatach z wykorzystaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej

Mgr inż. Mirosław GRZELKA

Ukończył studia na Wydziale Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej w 1997 roku. Dorobek naukowy to 34 publikacje na krajowych i zagranicznych konferencjach. 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.



Mirosław.Grzelka@put.poznan.pl

Streszczenie

Niektórzy producenci współrzędnościowych maszyn pomiarowych (WMP) oferują dodatkowe specjalizowane programy pomiarowe jak na przykład programy do pomiaru kół zębatach. Bardzo istotną sprawą jest dokładna metrologiczna analiza procesu i dokładności pomiaru koła zębatego z wykorzystaniem WMP. Z powodu braku analiz metrologicznych istniejących programów i braku możliwości dotarcia do poszczególnych algorytmów pomiarowych autor stworzył własne algorytmy i przeprowadził dokładną metrologiczną analizę błędów pomiaru elementarnych odchyłek wykonawczych kół zębatach. Powstałe algorytmy, program i analiza metrologiczna dokładności pomiaru kół zębatach z wykorzystaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej (WTP) są podstawą do zrealizowania kompleksowych pomiarów kół zębatach. Metoda pomiarów kompleksowych kół zębatach wiąże ze sobą nowoczesną technikę pomiarową oraz symulację współpracy jednostronnej kół zębatach, dając w efekcie końcowym odchyłki: kinematyczną i dynamiczną, jako całościowe parametry dokładności opisujące badane koła zębate.

Abstract

Some of the producers of the co-ordinate measuring machines (CMM) deliver many additional measuring programs for the special purposes as like programs for the measurement of the gears. It is of great importance to carry out the accurate metrological analysis of the measuring process and the final error of the gears' measurement with the CMM. Because it appeared impossible to analyze existing algorithms, the author created his own version and carried out the precise metrological analysis of the accuracy of basic gears' deviations measurement. The worked out algorithms, software and metrological analysis of the CMM's gears measurement accuracy is a basis for the complex measurement of the gears. The complex measuring method includes modern measuring devices and single flank measurement simulation. The final results are cinematic and dynamic deviations of the gear, the complex parameters describing the whole gear.

Słowa kluczowe: współrzędnościowa technika pomiarowa, koła zębate, pomiary współrzędnościowe kół zębatach

Keywords: coordinate measuring machines, gears, coordinate measurement of the gears

1. Wprowadzenie

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 zębatego wykonanego w danej klasie dokładności. Kryterium poprawności metrologicznej pomiaru zakłada, że dopuszczalny błąd pomiaru nie może przekroczyć 10% dopuszczalnej tolerancji (w szczególnych przypadkach 20%). Do przeprowadzenia całościowej metrologicznej oceny dokładności programu pomiarowego konieczne jest 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. Błędy wyznaczenia układu współrzędnych

Układ współrzędnych mierzonego koła zębatego tworzony jest na charakterystycznych elementach geometrycznych koła. W procesie technologicznym zęby koła nacinane są względem 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. Dlatego bardzo istotnym jest opracowanie metodyki i wyznaczenie błędów pomiaru środków okręgów.

Współrzędne środka każdego okręgu oblicza się ze wzorów [1]:

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum y_i^2 \sum x_i (x_i^2 + y_i^2) - \sum x_i y_i \sum y_i (x_i^2 + y_i^2)}{2 \sum x_i^2 \sum y_i^2 - 2 (\sum x_i y_i)^2} \\ y_0 &= \frac{\sum x_i y_i \sum x_i (x_i^2 + y_i^2) - \sum x_i^2 \sum y_i (x_i^2 + y_i^2)}{2 \sum x_i^2 \sum y_i^2 - 2 (\sum x_i y_i)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: x_p, y_p - współrzędne punktów pomiarowych wykorzystywanych do wyznaczenia środka okręgu.

Obliczenie współrzędne środka okręgu wykazują rozrzuty w zależności od rozłożenia i liczby punktów pomiarowych oraz błędów kształtu na rzeczywistym elemencie mierzonym.

Założono, że okrąg (tuleja/wałek ustalający) jest wykonany poprawnie w klasie 5-8 dokładności. 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:

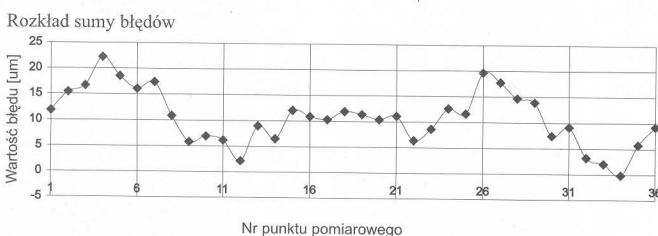
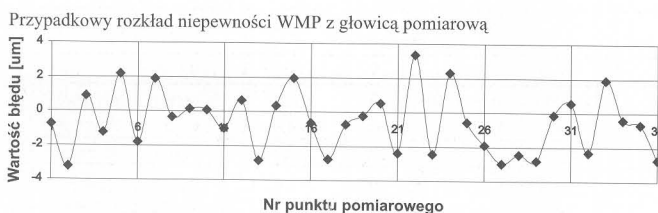
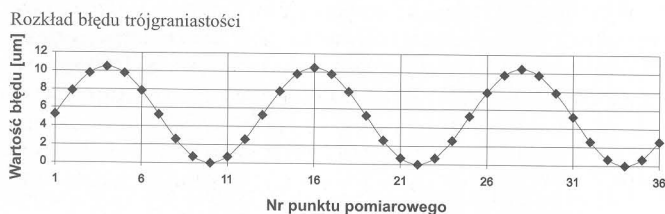
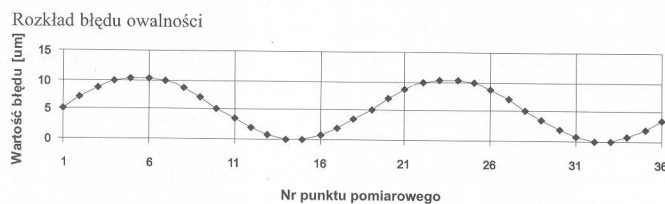
- dokładność WMP - $MPE_E(E)$ o wartości podanej przez producenta,
- pole tolerancji okręgu odpowiadające klasie 5, 6, 7 i 8 dokładności wykonania,
- odchyłki kształtu: owal i trójgraniastość jako najbardziej niekorzystne, o różnej wadze wpływu; przeprowadzone symulacje potwierdziły, że najbardziej niekorzystnym przypadkiem jest wystąpienie owalu i trójgraniastości o tej samej wadze wpływu, powoduje to odchyłkę kształtu o największej wartości,
- przypadkowy rozkład błędu 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÷250 mm oraz dla tolerancji dla 5÷8 klasy dokładności wykonania (H). Współrzędne ich środków wyznaczone były dla różnej liczby punktów pomiarowych równomiernie rozłożonych na obwodzie okręgu i różnych niepewności WMP.

Przykładowy wynik symulacji dla okręgu o promieniu $r=25$ mm, tolerancji wykonania $21 \mu\text{m}$, niepewności WMP $MPE_E=3,6 \mu\text{m}$ i 36 punktów pomiarowych przedstawia rys. 1. Błąd wyznaczenia współrzędnych środka przedstawionego okręgu wynosi $1,6 \mu\text{m} \pm 1,6 \mu\text{m}$.

Do analizy uzyskanych wyników wykorzystano program StatisticaPL. Współrzędne środków okręgów symulowanych wyznaczone były zgodnie z zależnością (1), a wyniki dla różnych niepewności WMP i różnej liczby punktów pomiarowych poddano ocenie zgodnie z rozkładem normalnym Gaussa. Zbiórcze wyniki zamieszczono w tabeli 1. Przedstawia ona błąd wyznaczenia środka okręgu w zależności od założonej liczby punktów pomiarowych i niepewności użytej do pomiaru WMP.



Rys. 1. Rozkład błędów dla okręgu o promieniu $r=25$ mm, tolerancji $21 \mu\text{m}$, niepewności WMP $MPE_E=3,6 \mu\text{m}$ i 36 punktów pomiarowych

Fig. 1. Distribution of errors circle which radius $r=25$ mm, tolerance $21 \mu\text{m}$, uncertainty CMM $MPE_E=3,6 \mu\text{m}$ and 36 measuring points

Dla najczęściej występujących w Polsce dokładnych WMP o niepewności pomiaru $MPE_E(E)=2,5 \mu\text{m}$ ustalono wytyczne dotyczące pomiaru współrzędnych środka okręgu (środka układu współrzędnych):

- dla 32 punktów pomiarowych błąd wyznaczenia współrzędnych środka okręgu nie przekracza $1,0 \mu\text{m}$ ($\pm 1 \mu\text{m}$),
- dla 16 punktów pomiarowych błąd wyznaczenia współrzędnych środka okręgu nie przekracza $2,0 \mu\text{m}$ ($\pm 2,0 \mu\text{m}$).

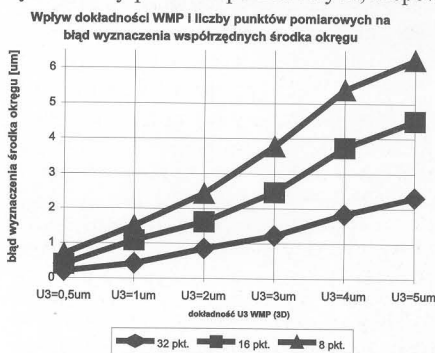
Tabela 1. Wpływ dokładności WMP i liczby punktów pomiarowych na błąd wyznaczenia współrzędnych środka okręgu

Table 1. Influence uncertainty CMM and number of measuring points on the error a middle gear coordinate

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

Przyjęto do dalszych badań założenie, że metrologicznie poprawne w pomiarach kół zębatach, będzie ustalanie początku układu współrzędnych poprzez pomiar okręgów w 32 punktach pomiarowych.

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 (tabela 1 oraz rys. 2).



odchyłek kształtu (tabela 1 oraz rys. 2).

Rys. 2. Wpływ dokładności WMP i liczby punktów pomiarowych na błąd wyznaczenia współrzędnych środka okręgu
Fig. 2. Influence uncertainty CMM and number of measuring points on the error a middle gear coordinate

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 wyznaczenia układu współrzędnych warunkują możliwość zastosowania WMP o znanej niepewności pomiaru do pomiaru kół zębatach wykonanych w danej klasie dokładności zgodnie z wytycznymi normy DIN 3962.

3. Grubość zęba koła zębatego a dokładność punktów pomiarowych

Podstawą przy ocenie dokładności pomiaru kół zębatach na WMP jest pomiar grubości zęba. Analiza pomiaru grubości zęba zgodnie z opracowanym algorytmem pomiarowym pozwala na wyznaczenie błędów pomiarowych wpływających na dokładność pomiaru grubości zęba i jej odchyłek. Są to: błąd promienia okręgu podziałowego, czyli miejsce położenia punktów pomiarowych do prawidłowego wyznaczenia grubości zęba i błąd zacementowania okręgu podziałowego, rozumiany jako błąd wyznaczenia środka układu współrzędnych.

3.1. Wpływ błędu promienia okręgu podziałowego na grubość zęba

Dokonano oceny wpływu błędu promienia okręgu podziałowego (położenia punktów pomiarowych) na grubość zęba. Przeprowadzono symulację obliczenia błędu wyznaczenia grubości zęba dla kół zębatach o modułach $m=1+12$ oraz dla liczb zębów $z=19+256$. Wyniki symulacji porównano z wytycznymi normy DIN 3962 dla poszczególnych klas dokładności.

Porównując wyniki symulacji z wytycznymi normy, określono, z jaką dokładnością należy pozycjonować końcówkę pomiarową (mierzyć punkt leżący na przecięciu promienia okręgu podziałowego i zarysu ewolwentowego), by metrologicznie poprawnie wyznaczyć grubość zęba w zależności od klasy dokładności wykonania koła. Tabela 2 przedstawia wyniki zgodnie z kryterium 0,1T.

Dla kół o modułach powyżej 1 do 3,55 wykonanych w 5 i 6 klasie dokładności błąd pozycjonowania nie może przekroczyć $2 \mu\text{m}$. Oznacza to konieczność doboru bardzo precyzyjnej WMP.

Tabela 2. Żądana dokładność pozycjonowania końcówki pomiarowej dla pomiaru grubości zęba (dopuszczalny błąd promienia podziałowego [μm]) według zasady 0,1T

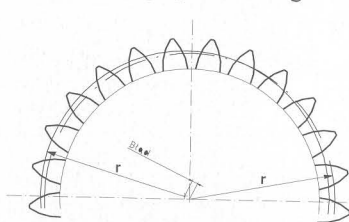
Table 2. The necessary accuracy position of measuring stylus for to measuring tooth thickness

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

↗ - powyżej 10 μm

3.2. Wpływ błędu środka układu współrzędnych na grubość zęba

Przeprowadzono symulacje wpływu błędu środka układu współrzędnych (rys. 3) na błąd wyznaczenia grubości zęba przy założeniu, że promień okręgu podziałowego nie jest obciążony błędem. Symulacje



przeprowadzono dla kół zębatych o modułach $m=1 \div 12$ oraz liczbie zębów $z=19 \div 256$.

Rys. 3. Wpływ błędu środka układu współrzędnych na grubości zębów
Fig. 3. Influence of error a middle gear coordinate on tooth thickness

Porównując wyniki symulacji z wytycznymi normy, określono maksymalny błąd wyznaczenia współrzędnych środka układu współrzędnych, by metrologicznie poprawnie mierzyć grubość zęba w zależności od klasy dokładności wykonania koła (tabela 3).

Tabela 3. Żądana dokładność wyznaczenia współrzędnych środka układu współrzędnych [μm] według zasady 0,1T

Table 3. The necessary accuracy of middle gear coordinate according 0,1T criterion

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

↗ - powyżej 10 μm

Zgodnie z kryterium 0,1T do pomiaru kół zębatych w 5 klasie dokładności oraz kół o modułach mniejszych od 6 wykonanych w 5, 6 i 7 klasie dokładności błąd wyznaczenia współrzędnych środka układu współrzędnych nie może być większy od 2 μm (szare pola w tabeli 3). Dla kół zębatych o modułach 1-2 wykonanych w 5 klasie dokładności maksymalny błąd wyznaczenia środka układu współrzędnych nie może przekroczyć 0,5 μm (czarne pole), co stawia bardzo duże wymagania WMP.

3.3. Podsumowanie

Wpływ błędu promienia okręgu podziałowego i błędu wyznaczenia środka układu współrzędnych na grubość zęba wskazuje, że parametrem warunkującym metrologiczną poprawność pomiaru i wyznaczenia grubości zęba jest błąd wyznaczenia początku układu współrzędnych.

Dzięki przeprowadzonym symulacjom można jednoznacznie stwierdzić, że błędy spowodowane metodyką i algorytmami pomiarowymi w trakcie wyznaczania układu współrzędnych koła zębatego ograniczają możliwość stosowania WMP do pomiaru kół zębatych wykonanych w określonej klasie dokładności.

4. Dokładność algorytmów

Ocena dokładności zastosowanych w programie pomiarowym algorytmów przeprowadzona została poprzez symulacje odchyłek

technologicznych i wyznaczenie na podstawie uzyskanych z symulacji punktów pomiarowych poszczególnych wielkości charakteryzujących koło zębate i ich odchyłek.

Pozwoliło to na wyznaczenie błędów identyfikacji poszczególnych wielkości i na ocenę metrologiczną zastosowanych algorytmów.

4.1. Korekta I

Zgodnie z opracowanymi zależnościami przeprowadzono symulacje dla różnych kół zębatych. Symulacjom poddano program odpowiedzialny za sprowadzenie punktów pomiarowych na powierzchnię rzeczywistą mierzonego koła zębatego w kierunku normalnym do niej o wartość promienia kulki końcówki pomiarowej (korekta I).

Wyniki symulacji potwierdzają metrologiczną poprawności korekty I. Sprowadzenie współrzędnych punktu pomiarowego na powierzchnię mierzoną zarysu nie powoduje błędów. Rzeczywiste błędy w stosunku do współrzędnych teoretycznych opisujących symulowane koła zębate nie przekraczały 0,006 μm. Przyjęto zerowy wpływ korekty I na błędy pomiaru koła zębatego zgodnie z opracowanym algorytmem.

4.2. Korekta II

Na podstawie symulacji stworzono współczynnik korekty II K_g warunkujący poprawność metrologiczną wyznaczenia grubości zęba i podziałek badanego koła zębatego. Dobór wartości współczynnika K_g przebiegał zgodnie z kryterium najlepszego dopasowania, czyli minimalizacji błędu wyznaczenia rzeczywistej grubości zęba koła zębatego. Współczynnik K_g zależy tylko od liczby zębów, dlatego do jego opisu wykorzystano funkcje: liniową, kwadratową i trzeciego stopnia. Błędy wyznaczenia grubości zębów (Δs) w zależności od postaci funkcji opisującej współczynnik K_g przedstawia tabela 4. Są one proporcjonalne do wartości modułu koła zębatego, dlatego ich wartości przedstawiono jako iloczyn $\Delta s/m$.

Tabela 4. Dobór współczynnika K_g według funkcji liniowej (A), kwadratowej (B) i trzeciego stopnia (C)

Table 4. Coefficient K_g selection according to line function (A), square function (B) and 3rd rank (C)

z	A	$\Delta s/m$	B	$\Delta s/m$	C	$\Delta s/m$
	K_g	$m=1$	K_g	$m=1$	K_g	$m=1$
17	3,8440	-0,1611	3,9711	0,0024	3,9692	-0,00001
20	4,5649	-0,1382	4,6744	0,0026	4,6724	-0,00001
25	5,7664	-0,1024	5,8485	0,0031	5,8461	0,00000
30	6,9679	-0,0695	7,0251	0,0039	7,0220	0,00000
35	8,1694	-0,0396	8,2042	0,0050	8,2003	0,00000
40	9,3709	-0,0126	9,3858	0,0064	9,3807	0,00000
45	10,5724	0,0113	10,5699	0,0081	10,5635	0,00000
50	11,7739	0,0323	11,7565	0,0101	11,7486	0,00000
55	12,9754	0,0504	12,9456	0,0123	12,9359	0,00000
60	14,1769	0,0655	14,1372	0,0148	14,1256	-0,00001
65	15,3784	0,0776	15,3313	0,0175	15,3175	-0,00001
70	16,5799	0,0867	16,5279	0,0205	16,5118	-0,00001
75	17,7814	0,0929	17,7270	0,0237	17,7083	-0,00001
80	18,9829	0,0961	18,9286	0,0271	18,9072	-0,00001
85	20,1844	0,0964	20,1327	0,0307	20,1084	-0,00001
90	21,3859	0,0937	21,3393	0,0346	21,3120	-0,00001
95	22,5874	0,0880	22,5484	0,0386	22,5179	-0,00001
100	23,7889	0,0794	23,7600	0,0428	23,7262	-0,00001
105	24,9904	0,0677	24,9741	0,0471	24,9368	-0,00001
110	26,1919	0,0532	26,1907	0,0516	26,1498	-0,00001
115	27,3934	0,0356	27,4098	0,0563	27,3651	-0,00001
120	28,5949	0,0151	28,6314	0,0611	28,5829	-0,00001
125	29,7964	-0,0084	29,8555	0,0661	29,8030	-0,00001
130	30,9979	-0,0348	31,0821	0,0712	31,0255	-0,00001
135	32,1994	-0,0642	32,3112	0,0764	32,2504	-0,00001
140	33,4009	-0,0966	33,5428	0,0817	33,4777	-0,00001
145	34,6024	-0,1319	34,7769	0,0871	34,7075	-0,00002
150	35,8039	-0,1702	36,0135	0,0926	35,9396	-0,00002

Najmniejsze wartości błędów grubości zębów uzyskano przy opisie współczynnika K_g funkcją trzeciego stopnia.

4.3. Całościowa ocena algorytmu - korekta I i II

Dla kół zębatach o różnych modułach (1+12), liczbach zębów (17+250), kącie zarysu 20° wykonanych w klasach dokładności 1+12 przeprowadzono symulacje obliczeniowe dla przypadkowych rozkładów odchyłek technologicznych oraz ich wartości maksymalnych odpowiadających poszczególnym klasom dokładności. Poprzez analizę wyników symulacji wyznaczono wpływ poszczególnych odchyłek na wyniki pomiaru oraz ich wzajemne oddziaływanie. Pozwoliło to na ocenę zastosowanych algorytmów.

Odchyłki, które symulowano: odchyłka promienia zasadniczego, odchyłka zarysu ewolwentowego.

Wynikami symulacji są:

- odchyłka promienia zasadniczego (dla każdego punktu pomiarowego, dla każdego boku zęba, wartości graniczne),
- odchyłka zarysu ewolwentowego (dla każdego punktu pomiarowego, dla każdego boku zęba, dla każdego zęba)
- odchyłka podziałek,
- sumaryczna odchyłka podziałek,
- odchyłka grubości zęba,
- mimośrodowość (wartość mimośrodowości jako połowa bicia, kątowe położenie wektora mimośrodowości w stosunku do osi y),
- linia boczna zęba,

Na podstawie przeprowadzonych symulacji i porównaniu wyznaczonych wartości odchyłek z wytycznymi normy DIN 3962 stwierdzono, że opracowane algorytmy poprawnie identyfikują symulowane odchyłki oraz wielkości charakteryzujące badane koło zębate i ich odchyłki.

Błąd promienia zasadniczego i zarysu ewolwentowego

Ocenę algorytmu pomiaru kół zębatach prowadzono poprzez symulowanie odchyłek promienia koła zasadniczego i zarysu ewolwentowego jako sumarycznych odchyłek zarysu. Symulowano zarówno losowy rozkład odchyłek jak również ich wartości graniczne. Wyniki potwierdziły słuszne założenia w algorytmach, a błąd wyznaczenia odchyłek technologicznych nie przekroczył $0,01 \mu\text{m}$.

Błąd podziałki obwodowej

Na odchyłkę podziałki obwodowej największy wpływ ma sumaryczna odchyłka zarysu spowodowana głównie błędem podziału. Różnice między odchyłką teoretyczną a wartością wyznaczoną nie przekracza $0,02 \mu\text{m}$. Spowodowana jest ona odkładaniem odchyłki teoretycznej (symulowanej) na prostej normalnej do zarysu teoretycznego w punkcie przecięcia ze średnicą podziałową badanego koła w głąb zęba, a nie na łuku okręgu podziałowego.

Błąd grubości zęba

Na odchyłkę grubości zęba, podobnie jak na odchyłkę podziałki, wpływa sumaryczna odchyłka zarysu ewolwentowego. Błędy jej wyznaczenia przy zerowych odchyłkach promienia zasadniczego i ewolwentu nie przekraczają $0,02 \mu\text{m}$. Wynika to z zastosowanej w algorytmie korekty II.

4.4. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika:

1. Poprawnie określono wszystkie występujące w algorytmie i programie pomiarowym korekty, co udowodniono, symulując zerowe odchyłki. Koło zostało poprawnie zidentyfikowane, a występujące różnice w wartościach odchyłek grubości zęba nie przekraczają $0,02 \mu\text{m}$.
2. Zadane odchyłki promienia okręgu zasadniczego i zarysu ewolwentowego są dokładnie identyfikowane.

3. Przy zadanych odchyłkach promienia okręgu zasadniczego i zarysu ewolwentowego błąd wyznaczenia odchyłki grubości zęba nie przekracza $0,02 \mu\text{m}$.
4. Wzajemny wpływ odchyłek promienia okręgu zasadniczego i zarysu ewolwentowego nie powoduje błędów ich wyznaczenia. Błąd nie przekracza $0,01 \mu\text{m}$.
5. Błąd wyznaczenia odchyłki grubości zęba i podziałek spowodowany jest odkładaniem odchyłek teoretycznych na normalnej do zarysu w punkcie przecięcia z okręgiem podziałowym, a nie na okręgu podziałowym. Wartości tych błędów są mniejsze niż $0,02 \mu\text{m}$.

5. Dokładność wyznaczenia poszczególnych odchyłek badanego koła zębatego

Dokładność wyznaczenia poszczególnych odchyłek badanego koła zębatego opisuje równanie:

$$\Delta() = \Delta_{x0,y0} + \Delta_{poz} + \Delta_{kor} \quad (2)$$

gdzie: $\Delta()$ - błąd wyznaczenia poszczególnych odchyłek koła zębatego (zarysu ewolwentowego, promienia zasadniczego, grubości zęba, podziałek, linii zęba, bicia), $\Delta_{x0,y0}$ - błąd wyznaczenia współrzędnych środka 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. Dla elementów wykonanych w klasach bardzo dokładnych (1+5) lub o bardzo małych wymiarach (bardzo wąskie pola tolerancji) możliwe jest założenie, by błąd pomiaru nie przekraczał 0,2 dopuszczalnej tolerancji (0,2T).

Błąd wyznaczenia środka układu współrzędnych

$$\Delta_{x0,y0} = f(N_{\text{pkt pom}}, E, \Delta_{\text{kształtu}}) \quad (3)$$

gdzie: $N_{\text{pkt pom}}$ - liczba punktów pomiarowych równomiernie rozłożonych na obwodzie okręgu mierzzonego, $E (MPE_E; U_3)$ - niepewność WMP, $\Delta_{\text{kształtu}}$ - błędy kształtu, owal i trójgraniastosc, jako odchyłki najczęściej występujące i najbardziej niekorzystnie wpływające na wyznaczenie współrzędnych środka okręgu.

Błąd pozycjonowania końcówki pomiarowej

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

$$\Delta_{poz} = MPE_E(E; U_3) \quad (4)$$

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).

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 ($\Delta_{kor} \equiv 0$) w dalszej ocenie powstałego programu.

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/wałka ustalającego. Błędy pomiaru poszczególnych wielkości koła zębatego przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Dokładność wyznaczenia poszczególnych odchyłek koła zębatego [μm] opisane zależnością (6.2)

Table 5. Accuracy to calculate of individual deviations of taste gear, according which equation (6.2)

MPE_E							
Liczba punktów	0,5	1,0	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
32	0,7	1,4	2,7	3,4	4,2	5,8	7,2
16	0,9	2,1	3,6	4,5	5,5	7,8	9,5
8	1,2	2,5	4,4	5,6	6,8	9,4	11,3

Dla najczęściej spotykanych w przemyśle polskim WMP o niepewności MPE_E ($E; U_3$) = $\pm 2,5 \mu\text{m}$, błąd pomiaru kół zębatych wynosi $3,4 \mu\text{m}$ (dla 32 punktów).

6. 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 6 zawarto wytyczne doboru WMP dla kryterium doboru 0,1T w zależności do klasy dokładności wykonania koła zębatego. Na WMP o niepewności $\pm 2,5 \mu\text{m}$ (przerwana linia na rys. 4) można przy użyciu opracowanego programu pomiarowego dokonać pomiaru kół zębatych wykonanych w 9 klasie dokładności o modułach 1÷2, 8 klasie o modułach 2÷6, 7 klasie o modułach 6÷10 oraz 6 klasie o modułach powyżej 10.

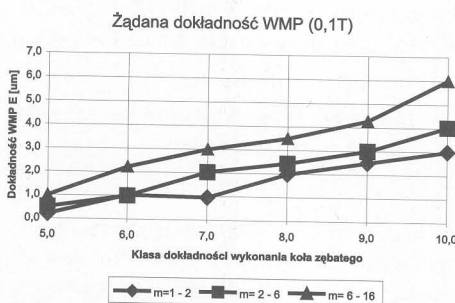
Tabela 6. Dokładność WMP [μm] dla pomiaru koła zębatego według kryterium 0,1T

Table 6. Accuracy CMM for gears measurement according 0,1T criterion

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 $MPE_E=0,3 \mu\text{m}$

▒ - WMP o dużej dokładności pomiarowej



Rys. 4. Dokładność WMP dla pomiaru koła zębatego według kryterium 0,1T

Fig. 4. Accuracy CMM for gears measurement according 0,1T criterion

7. 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 metodą minimalizuje się jego błąd. Wyznaczone błędy algorytmów i korekt zastosowanych w programie pozwalają znać 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 odchyłki.

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.

Badania wykonywane w ramach projektu badawczego KBN-8T07 D 00520

Literatura

- [1] E. Ratajczyk: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Maszyny i roboty pomiarowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.
- [2] T. Pfeifer, A. Hemdt: Berechnung der Basiselemente und der Tasterkompensation in der Koordinatenmesstechnik. Technisches Messen 57, 3, Oldenbourg Verlag, 1990.
- [3] J. Chajda, W. Woliński, A. Gazdecki: Model ząbienia zarysów ewolwentowych jako integralny element procesu pomiarowego kół zębatych. Materiały Konferencji „Koła zębate KZ'93” Poznań 1993, s.20-25.
- [4] ISO 10360-2 Coordinate metrology - Part 2: Performance assessment of coordinate measuring machines. CH-1211 Geneve 20. Switzerland 1994.
- [5] DIN 3962
- [6] J. Chajda, M. Grzelka: Możliwości kompleksowej oceny dokładności kół zębatych na współrzędnościowych maszynach pomiarowych. III Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Współrzędnościowa technika pomiarowa” Szczyrk'98, Zeszyty Naukowe z.28, Konferencje nr 44 (1998), str. 21-28.
- [7] M. Grzelka: THE RESEARCH METHODS OF SINGLE FLANK TESTING OF GEARS BY MEANS OF SIMULATION OF ELEMENTARY DEVIATIONS MEASURED WITH COORDINATE MACHINES, Measurement'99, 2nd International Conference on Measurement Smolenice Castle, Słowacja, April 26-29 1999, s. 293-296.
- [8] J. Chajda, M. Grzelka: 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.
- [9] M. Grzelka: Analiza dokładności pomiaru kół zębatych na współrzędnościowych maszynach pomiarowych, Konferencja Naukowo-Techniczna Koła Zębate: Warstwa wierzchnia, wytwarzanie, pomiary, eksploatacja, Politechnika Poznańska, Poznań, 15 listopada 2000, ss. 19-26.
- [10] M. Grzelka: Analiza wpływu odchyłek wykonawczych koła zębatego na błędy ich wyznaczenia, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej MECHANIKA z.57 Konferencja Naukowo-Techniczna Koła Zębate: Warstwa wierzchnia, wytwarzanie, pomiary, eksploatacja, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, 15 listopada 2001, ss. 69-78.

Title: The Accuracy of the Gears' Measurement with the Co-ordinate Measuring Machine