

MIROŚLAW GRZELKA*

POMIARY KÓŁ ZĘBATYCH NA WSPÓŁRZĘDNOŚCIOWEJ
MASZYNIE POMIAROWEJ

THE GEARS' MEASUREMENT WITH THE CMM

Streszczenie

Producenci współrzędnościowych maszyn pomiarowych (WMP) oferują całą gamę dodatkowych wyspecjalizowanych programów pomiarowych. Jednymi z nich są programy do pomiaru kół zębatach. Bardzo istotną sprawą jest dokładna metrologiczna analiza procesu i dokładności pomiaru koła zębatego z wykorzystaniem WMP. Z powodu 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) jest 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 rezultacie odchyłki: kinematyczną i dynamiczną, jako całościowe parametry dokładności opisujące badane koła zębata.

Słowa kluczowe: koła zębata, pomiary kół zębatach, współrzędnościowa technika pomiarowa

Abstract

Producers of the co-ordinate measuring machines (CMM) deliver many additional measuring programs for the special purposes. There are 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.

Keywords: gear, measurement of gear, coordinate measuring technique

* Dr inż. Mirosław Grzelka, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych, Politechnika Poznańska.

1. Wstęp

Program stworzony do pomiaru kół zębatach walcowych o zarysie ewolwentowym pozwala na pomiar wszystkich charakterystycznych wielkości geometrycznych opisujących mierzone koło zębate o zębach prostych wraz z ich odchyłkami. Mierzone wielkości to: promień zasadniczy, kąt zarysu, zarys ewolwentowy dowolnego zęba, podziałki obwodowe (zarówno prawe, jak i lewe), grubości zęba, linie zęba, topografia boku zęba.

Mierzone odchyłki od wielkości nominalnych to: odchyłki promienia zasadniczego, odchyłki kąta zarysu, odchyłki zarysu ewolwentowego, odchyłki poszczególnych podziałek (prawych i lewych), sumaryczna odchyłka podziałek (prawych i lewych), odchyłki grubości zębów, odchyłka linii zęba, odchyłka zarysu bocznego zęba.

Dane niezbędne do pomiaru i wyznaczenia poszczególnych wielkości i ich odchyłek to: liczba zębów, moduł, nominalny kąt zarysu.

Szczegółowy algorytm pomiarowy kół zębatach, zgodnie, z którym stworzono program pomiarowy z wykorzystaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej, szczegółowo opisano w pozycjach literaturowych: [6] i [8].

2. Dokładność wyznaczenia układu współrzędnych

Układ współrzędnych mierzonego koła zębatego w przestrzeni pomiarowej współrzędnościowej maszyny pomiarowej definiowany jest na otworze (walcu) mocującym, płaszczyźnie wieńca koła zębatego i na jednym z wrębów [3, 11, 12, 13].

Współrzędne środka układu współrzędnych wyznaczone są za pomocą pomiaru okręgu i odpowiedniego obliczenia zgodnie z algorytmem wyznaczania okręgu średniokwadratowego, przedstawionym w opracowaniu profesora Eugeniusza Ratajczyka „Współrzędnościowa technika pomiarowa. Maszyny i roboty pomiarowe” [1].

Współrzędne środka okręgu (x_0, y_0) można obliczyć ze wzorów:

$$x_0 = \frac{\sum dy_i^2 \sum dx_i (dx_i^2 + dy_i^2) - \sum dx_i dy_i \sum dy_i (dx_i^2 + dy_i^2)}{2 \sum dx_i^2 \sum dy_i^2 - 2(\sum dx_i dy_i)^2} \quad (1)$$

$$y_0 = \frac{\sum dx_i dy_i \sum dx_i (dx_i^2 + dy_i^2) - \sum dx_i^2 \sum dy_i (dx_i^2 + dy_i^2)}{2 \sum dx_i^2 \sum dy_i^2 - 2(\sum dx_i dy_i)^2} \quad (2)$$

gdzie: x_0, y_0 – współrzędne środka wyznaczonego okręgu, dx_0, dy_0 – współrzędne poszczególnych punktów na obwodzie mierzonego okręgu

a następnie wyliczyć promień R z zależności:

$$R = \sqrt{\sum (dx_i^2 + dy_i^2) - (x_0^2 - y_0^2)} \quad (3)$$

Obliczone na podstawie punktów pomiarowych wymiary (średnica i pozycja) wykazują znaczny rozrzut w zależności od rozłożenia i liczby punktów pomiarowych na rzeczywistych przedmiotach mierzonych. Liczne badania i doświadczenia praktyczne na wierconych i frezowanych przedmiotach mierzonych wskazują, że przy pomiarach

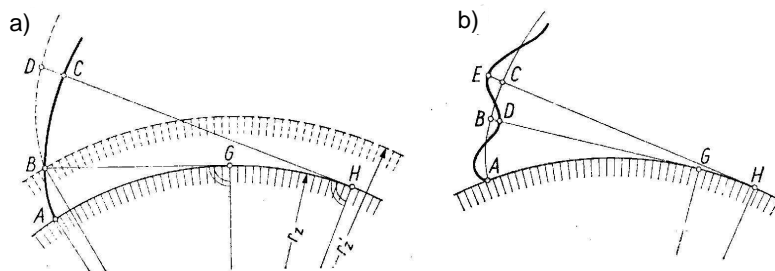
okręgów względnie stabilny wynik zarówno średnicy, jak i pozycji, uzyskuje się dopiero od około 16 punktów pomiarowych [2].

Dokonano wiele symulacji pomiarowych okręgu i wyznaczenia współrzędnych jego środka pod kątem analizy dokładności jego wyznaczenia. Założono, że okrąg (tuleja/wałek mocujący) jest wykonany poprawnie zgodnie z założoną dokumentacją i wymogami dokładnościowymi. Podczas analizy przyjęto: dokładność współrzędnościowej maszyny pomiarowej $MPE_E = \pm (3,5 + L/250)$, promienie okręgów: 25 mm, 50 mm, 100 mm i 200mm, szerokość pola tolerancji okręgu: 21 μm i 36 μm , błędy kształtu: owal i trójgraniastość jako występujące najczęściej, o tej samej wadze wpływu, przypadkowy rozkład błędu pochodzącego od maszyny współrzędnościowej i głowicy pomiarowej.

Wyznaczone błędy środka układu współrzędnych będą miały wpływ na dalszy proces pomiarowy, na procedury pomiarowe oraz na dokładność pozycjonowania i dokładność ruchów nastawczych, pomocniczych i - co najważniejsze - pomiarowych (najazdy na punkty pomiarowe). Do dalszej analizy przyjęto 32 punkty pomiarowe równomiernie rozmieszczone na okręgu i maksymalny błąd wyznaczenia współrzędnych jego środka $\pm 2\mu\text{m}$.

Zdefiniowanie wrębu odbywa się za pomocą pomiaru kilku punktów w okolicy średnicy podziałowej na obu bokach wrębu ustawionego jak najdokładniej w osi y współrzędnościowej maszyny pomiarowej. Wyznaczenie punktu symetrii wrębu odbywa się zgodnie z procedurami korekty stosowanymi przy pomiarze grubości zęba i podziałki koła zębatego, z tym, że wybierany jest punkt leżący najbliżej średnicy podziałowej. Dzięki tak zdefiniowanym punktom zostaje przeprowadzona prosta 2D leżąca na płaszczyźnie głównej (zdefiniowanej na wieńcu koła zębatego tak, by koło zębate znajdowało się po ujemnej stronie osi z), którą przypisuje się jako oś główną układu współrzędnych mierzonego koła.

3. Pomiar zarysu



Rys. 1. Błąd zarysu boku zęba: a) ewolwenta odwinięta z błędnego koła zasadniczego (większego), b) błąd kształtu ewolwenty

Fig. 1. The error of the tooth profile: a) involute based on the incorrect base circle (bigger diameter), b) geometrical error of the involute

W programie pomiarowym odizolowano od siebie odchyłkę zarysu jako odchyłkę samej ewolwenty (rys. 1b) – zwaną dalej odchyłką ewolwenty i promienia zasadniczego (rys. 1a).

Założono, że jeżeli ewolwenta została prawidłowo odwinęta z błędnego koła zasadniczego, to występuje (jest wyznaczana) odchyłka promienia zasadniczego.

Zastosowano korektę I, której zadaniem jest sprowadzenie współrzędnych środka kulki pomiarowej (współrzędne punktu odczytywane przez układ pomiarowy WMP i przekazywane do komputera i programu) do punktu rzeczywistego styku końcówki pomiarowej z zarysem zęba po wektorze normalnym do powierzchni – korekta o wielkość promienia kulki pomiarowej (jego wartość wyznaczana jest w procesie kalibracji).

3.1. Dokładność pomiaru promienia okręgu zasadniczego i zarysu ewolwentowego

Metodykę, strategię i procedury pomiarowe przy pomiarze promienia okręgu zasadniczego, zarysu ewolwentowego i ich odchyłek przedstawiono w [6], [7], i [9].

Symulacje na szerokim zakresie kół zębatych o różnych modułach i liczbie zębów potwierdziły słuszność i poprawność zastosowanej korekty I. Analizie poddano różnice wynikające z założonych i wyznaczonych odchyłek (promienia zasadniczego i ewolwenty). Symulowano poszczególne odchyłki niezależnie od siebie oraz występujące razem. Powstałe w procesie symulacji i obliczeń różnice (błędy wyznaczenia odchyłek zarysu) porównano z wytycznymi normy DIN 3926. Zgodnie z postulatami metrologicznymi, by pomiar można było uznać za metrologicznie poprawny, dokładność pomiaru danej wielkości nie powinna przekraczać 10% dopuszczalnej wartości. Dokładna analiza potwierdziła tę tezę. Błędy wyznaczenia odchyłek: promienia zasadniczego i zarysu ewolwentowego nie przekroczyły wartości 10% dopuszczalnej przez daną klasę dokładności wykonania koła zębatego według normy DIN 3926 [14, 15, 16, 17].

3.2. Dokładność pomiaru kąta zarysu

Odchyłka zarysu ewolwentowego nie wpływa na wartość kąta zarysu, co potwierdza symulacja. Wielkością, która znacząco wpływa na odchyłkę kąta zarysu, jest odchyłka promienia zasadniczego. Jej wpływ na odchyłkę kąta zarysu jest zgodny z zależnością:

$$\Delta\alpha_0 = \frac{\Delta r_z}{-0,1455 d_p \sin \alpha_0} \quad (4)$$

gdzie: $\Delta\alpha_0$ odchyłka kąta zarysu w minutach, Δr_z odchyłka promienia zasadniczego w μm , d_p średnica podziałowa, α_0 kąt zarysu.

Szczegółową analizę przedstawiono w [9] i [10].

4. Pomiar wielkości geometrycznych

4.1. Dokładność pomiaru grubości zęba, podziałki obwodowej i linii zęba

Zgodnie z definicją pomiaru grubości zęba i podziałki obwodowej pomiar powinien odbywać się na średnicy podziałowej. W procesie pomiaru na współrzędnościowej maszynie pomiarowej nie jest możliwe zebranie punktów pomiarowych w ten sposób, by jednocześnie znajdowały się na zarysie bocznym zębów i na średnicy podziałowej koła zębatego. Związane jest to z występowaniem odchyłek od wartości nominalnych (teoretycznych) wszystkich wielkości geometrycznych charakteryzujących badane koło

zębate. Problem jest o tyle skomplikowany, iż nie można przed przystąpieniem do pomiarów oszacować ich wartości.

W programie stworzono specjalny algorytm dający korektę II. Jej zadaniem jest odpowiednie przeniesienie punktu zmierzzonego, po korekcie I leżącego stosunkowo blisko średnicy podziałowej na średnicę podziałową. Przeprowadzono wiele analiz i prób znalezienia odpowiedniej metodyki i algorytmów.

Wyznaczono parametry i funkcję opisującą odpowiednią zależność korekty II od liczby zębów badanego koła zębatego. Poprawność potwierdziły symulacje dla wielkości teoretycznych i wielkości obciążonych znanymi odchyłkami. Symulowano odchyłki dla poszczególnych klas dokładności wykonania, różnych modułów i liczb zębów oraz dla punktów pomiarowych, które po korekcie I leżały na promieniu oddalonym od promienia podziałowego o 0,05 mm. Uzyskane wyniki obciążone były błędami wyznaczenia wielkości odchyłek mniejszymi od 0,5 μm . Przykładowo dla koła zębatego o liczbie zębów 150 i module 20 błąd wyznaczenia grubości zęba i podziałki obwodowej wyniósł zgodnie z algorytmem $-0,46 \mu\text{m}$. Symulacje i analiza metrologiczna potwierdziły poprawność i słuszność zastosowanej korekty II.

Przy pomiarze linii zęba punkty pomiarowe zbieramy na szerokości wieńca koła zębatego, korzystając z tych samych procedur pomiarów i algorytmów, zmieniając płaszczyznę pomiarową w osi z [8], popełniając te same błędy.

4.2. Dokładność pomiaru bicia

Bicie koła zębatego zdefiniowane jest w programie pomiarowym jako różnica między położeniem środka okręgu stworzonego przez okręgi wpisane we wręby a środkiem układu współrzędnych oraz wektor kierunkowy. Okręgi wpisane we wręby stworzone zostają z dwóch punktów, są to punkty na sąsiednich bokach zębów wykorzystywane do pomiaru podziałki i grubości poszczególnych zębów. Na tych dwóch punktach można opisać dwa okręgi o znanej średnicy. Średnica okręgów odpowiada średnicy wałeczka pomiarowego wykorzystywanego do pomiaru grubości zęba metodą wałeczkową. Do wyznaczenia bicia wykorzystywany jest okrąg, którego środek leży najdalej od środka układu współrzędnych. Jako wynik podawane są współrzędne środka powstałego okręgu, odległość od początku układu współrzędnych i kąt od osi y .

4.3. Dokładność pomiaru topografii boku zęba

Pomiar topografii boku zęba i błędy z nim związane są dokładnym złożeniem pomiarów i algorytmów występujących podczas pomiaru zarysu ewolwentowego i linii zęba.

5. Wnioski

Stworzone algorytmy pomiarowe i procedury obliczeniowe poddane zostały szczegółowej analizie. Symulacje przeprowadzono dla szeregu kół zębatach o modułach $m = 1+12$, liczbie zębów $z = 17+257$, kącie zarysu $\alpha_0 = 20^\circ$ i współczynnikiem korekcji $x = 0$. Symulowano zarówno koła teoretyczne – nie obciążone odchyłkami wykonawczymi i koła obciążone znanymi odchyłkami wykonawczymi. Podczas symulacji analizowano poprawność identyfikacji znanych odchyłek oraz - co najważniejsze - błędy ich wyznaczenia.

Potwierdziły one poprawność algorytmów i procedur obliczeniowych, a w szczególności zasadność i poprawne zastosowanie omówionych korekt I i II.

Największe błędy popełniane są podczas tworzenia układu współrzędnych przy pomiarze i ustaleniu środka okręgu bazowego. Maksymalny błąd (zgodnie z przeprowadzonymi symulacjami) można przyjąć $2\ \mu\text{m}$. Błąd środka układu współrzędnych jest przenoszony bezpośrednio na kolejne punkty nastawcze, punkty startowe do najazdu na punkty pomiarowe.

Korekta I - sprowadzenie współrzędnych środka kulki pomiarowej do punktu styku z mierzoną powierzchnią – została tak dobrana, by błędy identyfikacji rzeczywistego punktu styku maksymalnie zminimalizowano, co potwierdziły symulacje. Zarówno przy pomiarze odchyłki promienia zasadniczego, jak i zarysu ewolwentowego udowodniono poprawność wyznaczenia zadanej odchyłki zgodnie z założoną klasą dokładności wykonania, jak i jej błąd na poziomie 10% wartości dopuszczalnej, co jest metrologicznie poprawne.

Korekta II - sprowadzenie współrzędnych punktu rzeczywistego styku kulki pomiarowej z powierzchnią mierzonego koła zębatego (po korekcie I) do punktu leżącego na zarysie rzeczywistym i średnicy podziałowej mierzonego koła zębatego. Zadaniem jej jest uzyskanie punktów pomiarowych do wyznaczenia podziałek obwodowych (prawych i lewych), grubości zęba i bicia koła zębatego oraz ich odchyłek od wielkości nominalnych. Zastosowano tu zależność parametrów korekty do liczby zębów badanego koła zębatego opisanych funkcją trzeciego stopnia. Błędy wyznaczenia poszczególnych odchyłek dzięki zastosowanemu algorytmowi i korekty I są minimalne, a ich wartości są na poziomie mniejszym od $0,5\ \mu\text{m}$. Zastosowane tu uproszczenie polegające na odkładaniu założonego błędu nie na średnicy podziałowej, a na normalnej do zarysu przechodzącej przez punkt C (linii przyporu) ma wpływ na uzyskane wyniki, jednak końcowa analiza pozwoliła dopuścić to uproszczenie ze względu na małą wartość błędu identyfikacji mierzonych odchyłek wykonawczych. Jedyny istotny wpływ na dokładność pomiaru podziałek, grubości zęba i bicia mogła mieć dokładność wyznaczenia środka układu współrzędnych. Maksymalny błąd popełniony podczas pomiaru i wyznaczenia środka układu współrzędnych (środka otworu/walca bazowego) wyniósł zgodnie z przeprowadzoną symulacją i analizą wyników $2\ \mu\text{m}$ przy 32 punktach pomiarowych równomiernie rozłożonych na obwodzie mierzonego elementu bazowego $3\ \mu\text{m}$ przy 16 punktach pomiarowych. Wartość dokładności wyznaczenia współrzędnych środka układu współrzędnych jest zarazem dokładnością (błędem) ustalenia średnicy podziałowej badanego koła zębatego, na której zostają - zgodnie z definicją - mierzone podziałki, grubości zębów i zbierane punkty do określenia bicia koła zębatego. Przeprowadzono symulacje wpływu błędnego ustalenia średnicy podziałowej na odchyłki poszczególnych wielkości geometrycznych charakteryzujących badane koło [9] i [10].

Z analizy (tabela 1) wynika, że dla przyjętego błędu ($2\ \mu\text{m}$ – 32 punkty pomiarowe) można poprawnie metrologicznie mierzyć koła zębate wykonane w 5 klasie dokładności ($3\ \mu\text{m}$ – 16 punktów pomiarowych – 6 klasa dokładności wykonania), przy założeniu, że błąd pomiaru i wyznaczenia poszczególnych odchyłek nie przekraczają 10% wartości dopuszczalnej (co udowodniono w symulacji) [4, 19].

Tabela 1

Żądana dokładność pozycjonowania końcówki pomiarowej na promieniu podziałowym koła zębatego dla pomiaru grubości zęba i podziałki ($m = 1-12$) przy dopuszczalnym dziesięcioprocentowym błędzie wyznaczenia grubości zęba i podziałki obwodowej

Klasa dokładności	Średnica podziałowa koła zębatego				
	50–100	100–200	200–400	400–800	800–1600
5	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 2 \mu\text{m}$
6	$\pm 3 \mu\text{m}$	$\pm 3 \mu\text{m}$	$\pm 3 \mu\text{m}$	$\pm 3 \mu\text{m}$	$\pm 3 \mu\text{m}$
7	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$
8	$\pm 7 \mu\text{m}$	$\pm 7 \mu\text{m}$	$\pm 7 \mu\text{m}$	$\pm 7 \mu\text{m}$	$\pm 7 \mu\text{m}$
9	$\pm 9 \mu\text{m}$	$\pm 9 \mu\text{m}$	$\pm 9 \mu\text{m}$	$\pm 9 \mu\text{m}$	$\pm 9 \mu\text{m}$
10	↗	↗	↗	↗	↗

↗ – powyżej

Literatura

- [1] Ratajczyk E., *Współrzędnościowa technika pomiarowa. Maszyny i roboty pomiarowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.
- [2] Pfeifer T., Hemdt A., *Berechnung der Basiselemente und der Tasterkompensation in der Koordinatenmesstechnik*, Technisches Messen 57, 3, Oldenbourg Verlag, 1990.
- [3] Chajda J., Woliński W., Gazdecki A., *Model zazębienia 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 Geneva 20, Switzerland 1994.
- [5] Lotze W., *Zahnradmessung mit Koordinatenmessgeräten*, Grundlagen und Algorithmen für die 3D-Auswertung nach dem Flächenmodell, ISBN 3-00-015962-2 Eigenverlag, Dresden 2005.
- [6] Chajda J., Grzelka M., *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), s. 21-28.
- [7] Grzelka M., *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] 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.
- [9] Grzelka M., *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, s. 19-26.

- [10] Grzelka M., *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, s. 69-78.
- [11] Lotze W., *Präfkörper für Koordinaten-Melssgerate*, Feingerätetechnik 30 (1981).
- [12] Pfeifer T., Wollersheins H., *Messung der Zylinderformabweichung durch Ab-tastung der Mantellinie entlang einer Schraubenlinie*, Westdeutscher Verlag, 81.
- [13] Grzelka M., Gapiński B., *Recommendations on the Measurement of Cylindrical Gears with Coordinate Measuring Machines*, XVIII IMEKO World Congress, September, 17-22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil, s. 138.
- [14] DIN 3960 *Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderraden) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung*.
- [15] DIN 3961 *Toleranzen für Stirnradverzahnungen; Grundlagen*.
- [16] DIN 3962-1 *Toleranzen für Stirnradverzahnungen; Toleranzen für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen*.
- [17] DIN 3962-2 *Toleranzen für Stirnradverzahnungen; Toleranzen für Flankenlinienabweichungen*.
- [18] ISO 14253-2 *Guide to the estimation of uncertainty in measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification*.
- [19] Grzelka M., *Dokładność pomiaru kół zębatych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej*, Pomiary Automatyka Kontrola PAK 2-2004, s. 18-22.