

Jerzy SŁADEK, Barbara JURAS, Marcin KRAWCZYK, Adam GAŚKA
POLITECHNIKA KRAKÓWSKA, LABORATORIUM METROLOGII WSPÓLRZĘDNOŚCIOWEJ,
Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

Modelowanie błędów głowicy pomiarowej z zastosowaniem metody Monte Carlo

Dr hab. inż. Jerzy SŁADEK

Zorganizował i kieruje Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej. Specjalizuje się w metrologii stosowanej w procesach wytwarzania a szczególnie w metrologii współrzędnościowej. Stale współpracuje z wieloma ośrodkami badawczymi oraz laboratoriami w Europie, w tym z PTB w Niemczech, w zakresie rozwoju metod kontroli dokładności pomiarów i wzorcowania współrzędnościowych systemów pomiarowych.



e-mail: sladek@mech.pk.edu.pl

Dr inż. Marcin KRAWCZYK

Adiunkt w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej. Specjalizuje się w ocenie pomiarów współrzędnościowych oraz metodach oceny dokładności maszyn współrzędnościowych. W 2000 roku przebywał na rocznym stypendium naukowym w Physikalisches Technische Bundesanstalt in Braunschweig – czołowym europejskim ośrodku badawczym. Aktualnie współrealizuje projekt europejski TRACESYS.



e-mail: mkrawczyk@mech.pk.edu.pl

Dr inż. Barbara JURAS

Specjalizuje się w metrologii stosowanej w procesach wytwarzania a szczególnie w ocenie dokładności pomiarów realizowanych za pomocą współrzędnościowych maszyn pomiarowych, zagadnieniami pomiarów zarysów o zmiennej krzywiznie, swobodnie kształtowanych powierzchni oraz współrzędnościowymi pomiarami kół zębatach. Członek sekcji Inżynierii Jakości i Diagnostyki Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN. Członek Rady Wydziału Mechanicznego.



e-mail: juras@mech.pk.edu.pl

Mgr inż. Adam GAŚKA

Doktorant Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej. Tematyka, którą porusza w swoich badaniach to: wyznaczanie niepewności pomiarów współrzędnościowych, współrzędnościowa technika pomiarowa, zastosowanie metody Monte Carlo w metrologii, symulacja pomiarów współrzędnościowych, zagadnienia związane z mobilnymi systemami pomiarowymi (ramiona pomiarowe, laserowe systemy nadążne), zarządzanie jakością.



e-mail: agaska@mech.pk.edu.pl

Streszczenie

W obecnych czasach, gdy nowoczesne techniki wytwarzania umożliwiają produkcję części z coraz to większą dokładnością, a tolerancje ich wykonania stają się coraz węższe, pojawia się potrzeba bardzo dokładnego wyznaczania niepewności pomiarów. Ważne jest również, aby proces estymacji niepewności stawał się jak najszybszy. Z tego powodu najlepiej rozwinięte laboratoria metrologiczne starają się stworzyć wirtualne modele WMP, które są w stanie wyznaczyć niepewność pomiarów w czasie quasi-rzeczywistym. Ten artykuł przedstawia sposób modelowania błędów głowicy pomiarowej z wykorzystaniem metody Monte Carlo. Błędy głowicy pomiarowej stanowią znaczną część całkowitych błędów maszyny pomiarowej, a zaprezentowany model może zostać wykorzystany jako jeden z modułów wirtualnej WMP.

Słowa kluczowe: głowica pomiarowa, niepewność, metoda Monte Carlo.

Modeling of probing system errors by use of Monte Carlo method

Abstract

Nowadays, when the manufacturing technologies are getting more and more precise, and the tolerances are getting narrower, there is a need of expressing the uncertainty of measurement at the really high level. It is also important to make the uncertainty estimation as quick as possible. This is why the most developed metrological laboratories are trying to create the virtual CMM models that can handle uncertainty evaluation in quasi-real time. This paper shows how to model, with use of the Monte Carlo method, the probing system errors which are one of the most significant errors of CMMs. The presented model can then be used as a module of virtual CMM. Paragraph 2 presents the theoretical basis of probing system operation. It also points out the factors causing probing system errors. The mentioned model of probe head errors is presented in Paragraph 3. Paragraph 4 gives the results of the measurements and simulations that have been performed to show functionality and correctness of the model. Conclusions and areas of development are presented in Paragraph 5.

Keywords: probe head, uncertainty, Monte Carlo.

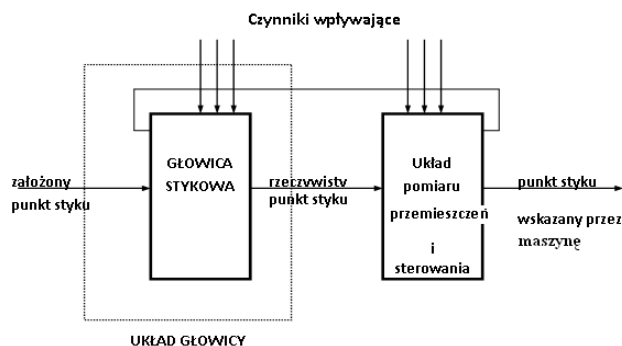
1. Wstęp

W dzisiejszych czasach, w erze nowoczesnych technologii i precyzyjnej inżynierii zadania przed którymi stawia się metrologów są coraz trudniejsze. Jednym z głównych wyzwań, którym metrolog musi stawić czoło jest ewaluacja niepewności pomiarów współrzędnościowych. Niepewność urządzeń metrologicznych, takich jak współrzędnościowe maszyny pomiarowe (WMP) ma znaczący wpływ na całkowitą niepewność pomiaru. W celu polepszenia oraz przyspieszenia procesu szacowania niepewności tworzone są wirtualne modele WMP. Model wirtualny zawiera dane dotyczące dokładności WMP pogrupowane w kategoriach, które najczęściej stanowią oddzielne moduły wirtualnej maszyny. Moduły te są przeznaczone do symulowania błędów geometrycznych WMP, błędów układu stykowego, wpływu zmian temperaturowych, wpływu obranej strategii pomiarowej, itp. [1, 2]. Artykuł ten jest poświęcony modelowaniu niepewności układu stykowego, a model w nim przedstawiony może zostać wykorzystany jako jeden ze wspomnianych modułów wirtualnej WMP.

Model błędów głowicy pomiarowej został utworzony z wykorzystaniem metody Monte Carlo (MMC). MMC jest metodą numeryczną wykorzystywaną do modelowania matematycznego procesów, których wartość jest trudna do wyznaczenia w sposób analityczny. W metrologii współrzędnościowej jest ona wykorzystywana głównie do wyznaczania niepewności pomiarów, ale zostało również udowodnione [3, 4], że może ona zostać wykorzystana do różnorodnych symulacji. MMC sama w sobie jest metodą numeryczną, ale dzięki procesowi losowego próbkowania z funkcji gęstości prawdopodobieństwa, na którym bazuje, wprowadza ona pewien poziom losowości do modelu i dlatego wydaje się być doskonałym narzędziem do symulacji złożonych problemów. Z tego właśnie powodu została ona wybrana przez autorów jako idealna metoda do modelowania błędów systemu stykowego WMP.

2. Błędy układu stykowego

Funkcjonowanie układu stykowego może zostać opisane prostym schematem przedstawionym na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat funkcjonowania układu przyjmowania punktów pomiarowych
Fig. 1. The workings of probing system

Współrzędne wybranego punktu styku różnią się od rzeczywistych współrzędnych punktu styku o błąd wynikający z wymiarów i kształtu zakończenia stykowego końcówki pomiarowej oraz wzajemnego oddziaływania końcówki pomiarowej - powierzchnia mierzona. Praktycznie różnica nie ma tak istotnego znaczenia, jak różnica między rzeczywistymi współrzędnymi i wskazanymi przez układ pomiaru przemieszczeń maszyny jako punkt styku końcówki pomiarowej z powierzchnią mierzoną. Różnica tych współrzędnych odpowiada błędowi głowicy stykowej. Błąd ten jest sumą wielu przyczyn i stanowi jedną ze składowych błędów odtwarzalności punktu pomiarowego WMP. Błędy głowicy stykowej są tą składową błędów odtwarzalności, której wartość nie zależy od położenia w przestrzeni pomiarowej WMP. Błędy te są zależne od wielu czynników [5]. Głównym kryterium jest budowa i zasada działania głowicy pomiarowej. Głowice dzieli się na dwie zasadnicze grupy: głowice mierzące (skaningowe) oraz głowice przełączające (impulsowe). Wszystkie rozważania przedstawione w tym artykule dotyczą głowic mierzących.

Błędy głowic są zależne przede wszystkim od [1]:

- x_{chr} - stanu powierzchni mierzonej (chropowatość i błędy kształtu),
- x_{spl} - odkształceń stykowych kulki pomiarowej,
- x_u - ugięcia końcówki stykowej pod działaniem siły pomiarowej,
- x_{ksz} - wpływu błędów kształtu kulki stykowej,
- x_p - drogi przełączania dla głowic elektrostykowych,
- x_i - nieliniowości i zróżnicowania charakterystyki przetworników indukcyjnych w poszczególnych kierunkach wychyleń głowic mierzących,
- x_n - reakcji na nierównomierne obciążenie głowicy pomiarowej i związane z tym błędy systemu wyrównoważenia elektrycznego,
- x_{cz} - błędów związanych ze zmianą czułości przetworników dla głowic ze zmienną charakterystyką (np. typu VAST -Zeiss, lub TRAX Leitz-Brown&Sharpe),
- x_{zk} - wartości błędów związanych ze zmianą kierunku działania.

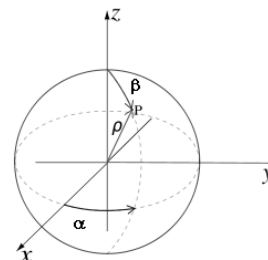
Całkowity błąd BG głowicy pomiarowej (w kierunku określonej osi pomiaru) można zapisać w postaci sumy błędów składowych:

$$BG_x = x_{chr} + x_{spl} + x_{ksz} + x_p + x_i + x_n + x_{cz} + x_{zk} \quad (1)$$

Dla wszystkich możliwych kierunków wychyleń głowicy błąd głowicy przyjmuje postać funkcji zależnej od kąta α zawartego pomiędzy kierunkiem pomiaru a normalną do mierzonej powierzchni (kąta wychylecia końcówki pomiarowej), nazywanej Funkcją Błędów Głowicy - *FBG*. Funkcję tę można zapisać w następującej postaci:

$$FBG = (\alpha, BG) \quad (2)$$

Funkcja przedstawiona przez (2) może być zinterpretowana jako dwuwymiarowa charakterystyka głowicy pomiarowej (V_{xy}) [2]. Opisanie błędów głowicy tym równaniem jest pewnym uproszczeniem z tego względu, że przy pomiarach współrzędnościowych (pomiarów sfer, stożków, itp.) końcówka pomiarowa wychyla się w trzech kierunkach i aby opisać jej całkowity kąt wychylecia należy użyć co najmniej dwóch kątów (jak przy współrzędnych sferycznych (rys. 2)).



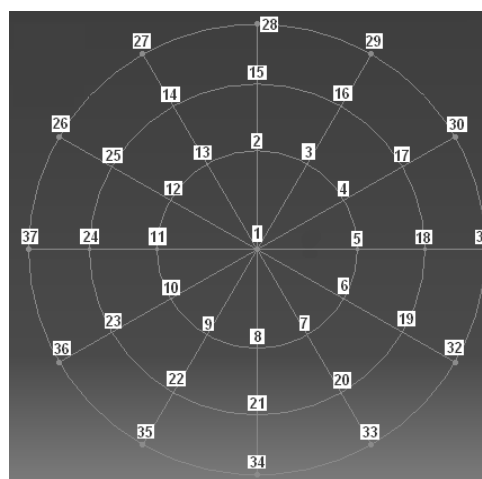
Rys. 2. Współrzędne sferyczne
Fig. 2. Spherical coordinates

Autorzy zdecydowali zatem aby opisać funkcję *FBG* jako funkcję dwóch zmiennych będących kątami α i β , w celu uzyskania pełnej informacji o błędach głowicy pomiarowej w przestrzeni trójwymiarowej. Ostateczna forma *FBG* została pokazana na (3):

$$FBG = (\alpha, \beta, BG) \quad (3)$$

3. Utworzony model błędów układu stykowego

W celu utworzenia modelu błędów głowicy pomiarowej, należy dysponować odpowiednim zbiorem danych, który ukazuje ogólny obraz błędów głowicy w zależności od kątów α i β . Dane te mogą zostać wyznaczone w sposób eksperymentalny poprzez pomiar wzorca kulistego. Średnica tego wzorca musi być na tyle niewielka aby jego błędy kształtu były pomijalnie małe (średnica kuli powinna być mniejsza od 30 mm). Pomiaru należy wykonywać poprzez równomierne zwiększanie kątów α i β o tą samą wartość. Autorzy przyjęli, że kąty α i β będą zmieniać się co 30° , przy czym α zmienia się w przedziale od 0° do 360° , a β od 0° do 90° (punkt 0° , 0° znajduje się na biegunie kulki). Jedna sekwencja pomiarowa składa się zatem z 37 punktów co prezentuje rysunek 3.



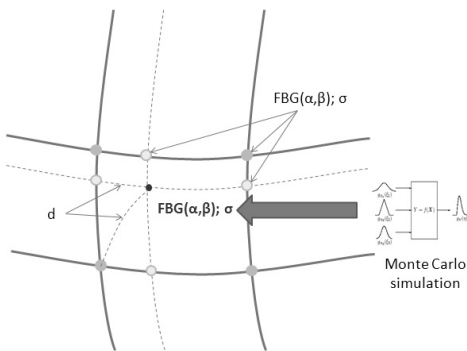
Rys. 3. Sekwencja pomiarowa (widok z góry kuli w kierunku płaszczyzny XY)
Fig. 3. Sequence of measuring points (view from the top of sphere to XY plane)

Sekwencja pomiarowa powinna zostać powtórzona kilkakrotnie, w celu uzyskania statystycznie reprezentatywnej próbki opisu-

jącej błędy głowicy pomiarowej. Model zaprezentowany w tym artykule został utworzony na podstawie danych uzyskanych z 15 powtórzeń sekwencji pomiarowej.

Gdy dane zostały już zebrane, wyznaczyć należy średni błąd kształtu w poszczególnych punktach oraz jego odchylenie standardowe. Wartości te są następnie wykorzystane jako reprezentacja błędu systematycznego (średnia) oraz przypadkowego (odchylenie standardowe) głowicy pomiarowej dla kątów wychylenia równych (α, β) , stanowiących węzły siatki referencyjnej opisanej poniżej. Łatwo zauważyć, że punkty pomiarowe rozłożone są regularnie na sferze i znajdują się na płaszczyznach stanowiących przekroje wzorca sferycznego. Płaszczyzny te (płaszczyzny zorientowane pionowo, wszystkie zawierające biegum kuli) są skrócone o kąt α w stosunku do płaszczyzny XZ lub (płaszczyzny zorientowane poziomo) zawierają wszystkie punkty na sferze, których kąt β ma tą samą wartość (np. wszystkie punkty, których kąt $\beta = 30^\circ$). W tych płaszczyznach mogą zostać wyznaczone dyskretne charakterystyki 2D przedstawiające błąd systematyczny głowicy w zależności od jednego z kątów wychylenia końcówki pomiarowej (dla płaszczyzn zorientowanych pionowo charakterystyki będą dotyczyły kąta β , a dla zorientowanych poziomo kąta α). Następnym krokiem jest wyznaczenie aproksymacji funkcji błędów w poszczególnych płaszczyznach w celu uzyskania funkcji ciągłych. W rezultacie, wyznaczone funkcje stanowią funkcje $FBG(\alpha)$ i $FBG(\beta)$ przedstawiające zmiany błędów głowicy w zależności od kątów wychylenia we wspomnianych płaszczyznach. Funkcje te przedstawiają wartość systematyczną błędu głowicy pomiarowej dla wszystkich punktów leżących na poszczególnych płaszczyznach. Błąd przypadkowy jest symulowany przez MMC, przy czym wielkości wejściowe dla symulacji stanowią odchylenia standardowe wyznaczone w węzłach siatki referencyjnej.

Punkty siatki pomiarowej leżące na omawianych płaszczyznach tworzą w przecięciu ze sferą wzorcową linie, które można nazwać południkami (linie zorientowane pionowo) oraz równoleżnikami (linie zorientowane poziomo). Dla punktów nie leżących na żadnej z wspomnianych linii ewaluacja błędów systematycznych i przypadkowych jest nieco inna. Wszystkie takie punkty znajdują się na wycinku sfery ograniczonym dwoma południkami oraz dwoma równoleżnikami. W celu wyznaczenia błędu systematycznego dla punktu, którego położenie może zostać opisane kątami (α, β) , należy wcześniej wyznaczyć wartości $FBG(\alpha)$ na obu otaczających go równoleżnikach oraz wartości $FBG(\beta)$ na obu otaczających go południkach. Następnie wykonywana jest symulacja Monte Carlo. Symulacja ta jako wielkości wejściowe traktuje wartości charakterystyczne (średnia i odchylenie standardowe) w węzłach siatki referencyjnej oraz wyznaczone w poprzednim kroku wartości $FBG(\alpha)$ i $FBG(\beta)$ na otaczających rozpatrywany punkt równoleżnikach i południkach. Model MC bierze również pod uwagę odległość symulowanego punktu od węzłów siatki oraz od otaczających go równoleżników i południków rys. 4.



Rys. 4. Działanie modelu dla punktów nie leżących na siatce referencyjnej
Fig. 4. Working of the model for points not lying on the reference grid

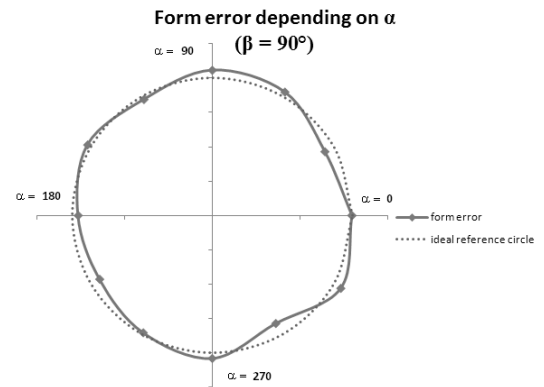
Poza wartością błędu systematycznego głowicy pomiarowej w kierunkach wychylenia określonych przez kąty α i β , wyzna-

czany jest również błąd przypadkowy głowicy jako odchylenie standardowe policzone z zasymulowanego n razy punktu. W rezultacie, symulacja zwraca błąd głowicy pomiarowej $FBG(\alpha, \beta)$ dla wszystkich możliwych kierunków wychylenia α i β . Zasymulowany błąd składa się z dodanych do siebie części systematycznej i przypadkowej.

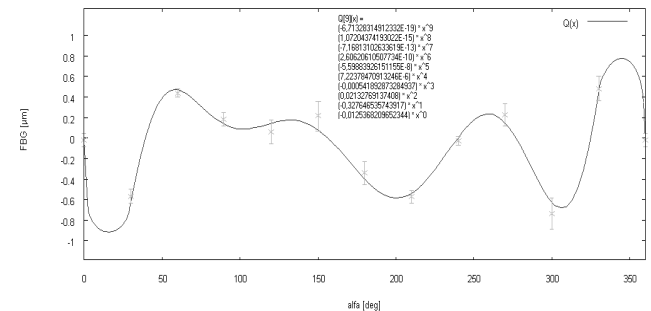
4. Wykonane pomiary i symulacje

Przykładowy model przedstawiony w tym artykule został utworzony dla głowicy mierzącej Leitz zamontowanej na maszynie PMM12106 firmy Leitz. Jako wzorzec mierzona była kula wzorcowa o średnicy $d = 24,9944$ mm. Punkty były zbierane według sekwencji pokazanej na rys. 3.

Poniżej przedstawione zostały przykładowe wyniki pomiarów w wybranych przekrojach kuli oraz aproksymacje funkcji $FBG(\alpha)$ i $FBG(\beta)$ dla tych przekrojów.

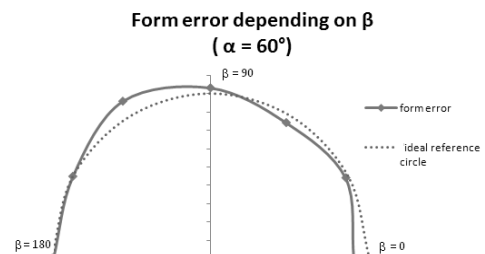


Rys. 5. Zależność błędów kształtu od kąta α w przekroju dla $\beta = 90^\circ$
Fig. 5. Dependence of form errors on α at intersection for $\beta = 90^\circ$

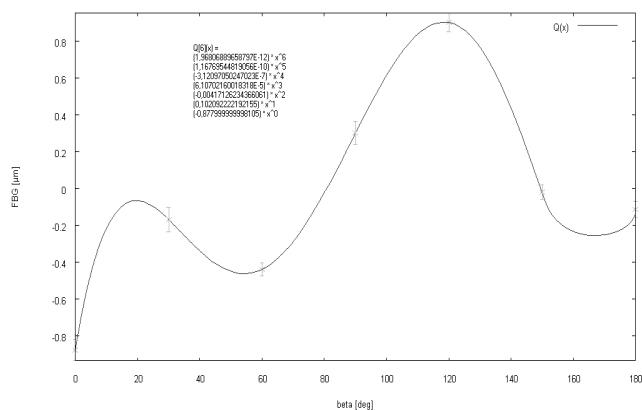


Rys. 6. Aproksymacja funkcji $FBG(\alpha)$ w przekroju dla $\beta = 90^\circ$
Fig. 6. Approximation of $FBG(\alpha)$ at intersection for $\beta = 90^\circ$

Funkcja aproksymacji została wyznaczona przy pomocy metody najmniejszych kwadratów, współczynniki wielomianu aproksymującego są podane powyżej wykresu funkcji. Maksymalny błąd tej aproksymacji wynosi $0,114 \mu\text{m}$.



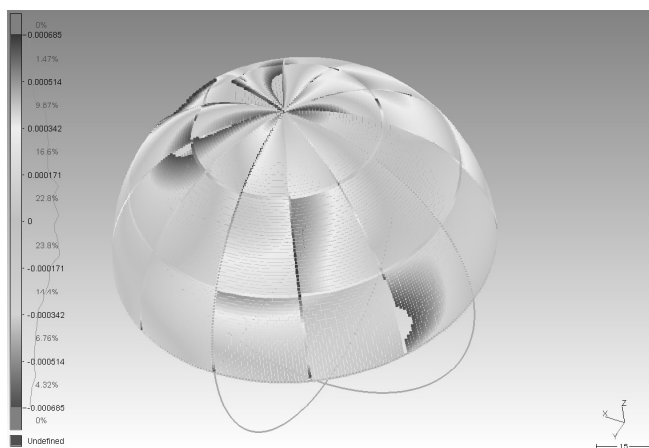
Rys. 7. Zależność błędów kształtu od kąta β w przekroju dla $\alpha = 60^\circ$
Fig. 7. Dependence of form errors on β at intersection for $\alpha = 60^\circ$



Rys. 8. Aproksymacja funkcji $FBG(\beta)$ w przekroju dla $\alpha = 60^\circ$
 Fig. 8. Approximation of $FBG(\beta)$ at intersection for $\alpha = 60^\circ$

Maksymalny błąd tej aproksymacji wynosi $0,018 \mu\text{m}$.

Po wyznaczeniu równań funkcji FBG w każdym przekroju, można przystąpić do symulacji MMC. W opisywanym przykładzie symulacja była powtarzana $n = 20\,000$ razy (gdzie n oznacza liczbę prób Monte Carlo) dla każdego punktu, który tego wymagał (dla punktów leżących w węzłach siatki referencyjnej nie ma potrzeby symulowania czegokolwiek). Rozkłady prawdopodobieństwa opisujące wszystkie punkty zostały przyjęte jako rozkłady t (zgodnie z [6]). Po symulacji $FBG(\alpha, \beta)$ z inkrementacją 1° zarówno dla kąta α jak i β (co w sumie daje liczbę 32 760 kombinacji), zasymulowane wartości zostały porównane z rzeczywistym pomiarem wzorca w 224 punktach. Średnia wartość odchyłek pomiędzy wartościami zasymulowanymi a zmierzonymi błędów głowicy dla poszczególnych kątów wychylenia była równa $0,00005 \text{ mm}$, przy czym odchyłka maksymalna była równa $0,00012 \text{ mm}$. Wyniki symulacji zostały zaprezentowane na rysunku 9.



Rys. 9. Kula wzorcowa o średnicy $d = 24,9922 \text{ mm}$ porównana z zasymulowanymi punktami
 Fig. 9. Ideal sphere of $d = 24,9944 \text{ mm}$ compared to simulated points

5. Wnioski

Rezultaty wykonanych symulacji w porównaniu z wynikami rzeczywistych pomiarów pokazują, że utworzony model stanowi wierną reprezentację rzeczywistości. Model umożliwia użytkownikowi symulację pojedynczych punktów i w tym zastosowaniu otrzymany wynik może zostać dodany do pozostałych błędów maszyny pomiarowej (błędy geometryczne, temperaturowe) w celu wyznaczenia dokładności całego pomiaru i uzyskania w ten sposób wirtualnego modelu WMP. Może on zostać również wykorzystany do symulowania błędów głowicy pomiarowej

w całej przestrzeni pomiarowej. Dzięki temu, pełny obraz błędów głowicy pomiarowej dla wszystkich możliwych kątów α i β może zostać uzyskany poprzez pomiar niewielkiej liczby punktów na wzorcu (artykuł prezentuje funkcjonowanie modelu utworzonego z pomiarów jedynie 37 punktów).

W dzisiejszych czasach, gdy zaistniała potrzeba stosowania precyzyjnych głowic pomiarowych (takich dla których $MPE_p \leq 0,1 \mu\text{m}$) pojawił się problem sprawdzania tego typu głowic. Zgodnie z [5], [7] proces sprawdzania tych głowic wymagałby wytworzenia wzorców o błędzie kształtu na poziomie $0,01 \mu\text{m}$. Jest to wymaganie, któremu sprostanie z pewnością przez długi okres czasu będzie niemożliwe. Ze względu na to należy utworzyć nowe metody, które umożliwiłyby sprawdzanie tego typu głowic. Metoda pokazana w tym artykule jest metodą numeryczną, która bazuje na danych uzyskanych w sposób empiryczny. Jej charakter sprawia, że mogłaby ona zostać zastosowana w tego typu zadaniach. Należałoby natomiast skompensować lub odfiltrować rzeczywiste błędy kształtu wzorca oraz kulki pomiarowej, które wpływają na wartości uzyskiwane z zastosowaniem przedstawianego modelu.

Podsumowując, metoda Monte Carlo została wykorzystana do symulowania wartości błędu przypadkowego gdy wartość jednego z kątów była równa wielokrotności 30° , oraz do symulowania błędu systematycznego, gdy żaden z kątów wychylenia nie był równy wielokrotności 30° . MMC udowodniła swoją przydatność w kolejnym rodzaju symulacji urządzeń metrologicznych (wcześniej była wykorzystywana w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej m.in. do symulowania pomiarów wykonywanych na Współrzędnościowym Ramieniu Pomiarowym) co pokazuje różnorodność jej zastosowań oraz jej ogromny potencjał, który nie może być przeceniony przez współczesnego metrologa.

6. Literatura

- [1] Śladek J.: Modelowanie i ocena dokładności maszyn i pomiarów współrzędnościowych, - Wyd. Polit. Krak.-Monografie zeszyt 53 Kraków 2001.
- [2] Ratajczyk E.: Współrzędnościowa Technika Pomiarowa, Wyd. Polit. Warszawskiej Warszawa 2005.
- [3] Śladek J., Ostrowska K., Gąska A. Wirtualne Współrzędnościowe Ramie Pomiarowe (WWRP), PAK, nr 01/2010.
- [4] Śladek J., Kupiec R., Gąska A., Kmita A.: Modelowanie czynników temperaturowych, wpływających na niepewność pomiaru, przy pomocy metody Monte Carlo, PAK, nr 01/2010.
- [5] Śladek J.: Ocena dokładności głowic stykowych stosowanych w wieloosobowych maszynach pomiarowych. - Praca Doktorska - Politechnika Krakowska Wydział Mechaniczny 1990.
- [6] Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method, ICGM, Final draft, Wrzesień 2006.
- [7] Woźniak A.: Dokładność stykowych głowic pomiarowych maszyn współrzędnościowych, Warszawa 2008.
- [8] Jakubiec W., Malinowski J.: Metrologia Wielkości Współrzędnościowych, Wyd. Polit. Warszawskiej Warszawa 2005.
- [9] Dobosz M., Woźniak A.: Influence of measured objects parameters on CMM touch trigger probe accuracy of probing, Precision Engineering, Volume 29, Issue 3, July 2005, Pages 290-297.
- [10] Schwenke H., Siebert B.R.L., Waldele F., Kunzmann H.: Assessment of uncertainties in dimensional metrology by Monte Carlo simulation: proposal of a modular and visual software, Ann CIRP 49 (2000) (1), pp. 395–398.