

## **O P I N I A**

### **o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Tomasza BARTKOWIAKA pt. „Dokładność montażu korpusowych zespołów obrabiarkowych”**

#### **1. Ocena wyboru tematu rozprawy**

Współczesne obrabiarki sterowane numerycznie zalicza się do bardziej skomplikowanych urządzeń mechatronicznych od których wymaga się wysokiej dokładności obróbki przy równoczesnym spełnieniu dużej wydajności, trwałości i niezawodności. Cechy te są w znaczącym stopniu zależne od dokładności i sztywności układu korpusowego, stanowiącego tzw. komponent mechaniczny systemu obrabiarka-proces skrawania. Doktorant podjął próbę usprawnienia procesu technologicznego produkcji komponentu mechanicznego obrabiarki CNC a szczególnie procesu jego montażu. W procesie montażu tkwią bowiem duże rezerwy, których właściwe wykorzystanie może przyczynić się do znaczącego wzrostu dokładności geometrycznej i kinematycznej uprzednio wspomnianego komponentu mechanicznego (układu korpusowego obrabiarki). Widoczne korzyści w tym zakresie można uzyskać przez racjonalny dobór w procesie montażu elementów korpusowych, zapewniający minimalną wartość maksymalnego błędu objętościowego w przestrzeni roboczej obrabiarki w punkcie odpowiadającym najniekorzystniejszemu skojarzeniu (konfiguracji) elementów korpusowych. Doktorant opracował i przedstawił sposób doboru elementów korpusowych w procesie montażu w którym w tworzeniu wariantów skojarzeniowych pod kątem minimalizacji maksymalnego błędu objętościowego w przestrzeni roboczej wykorzystano wyniki pomiarów dokładności wykonania ich powierzchni roboczych. Przyjęty przez Doktoranta kierunek poszukiwania sposobu poprawy dokładności montowanych obrabiarek jest właściwy, stad wybór tematu rozprawy jest trafny.

#### **2. Charakterystyka i ocena rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Tomasza Bartkowiaka składa się ze spisu treści, streszczenia, abstraktu, wykazu ważniejszych oznaczeń, pięciu rozdziałów, wniosków, literatury i dodatków do pracy.

W rozdziale zatytułowanym „Przegląd aktualnego stanu wiedzy” dokonano przeglądu literatury dotyczącej dokładności obrabiarek sterowanych numerycznie, przyczym przegląd ten uporządkowano i odniesiono do: niedokładności geometrycznej obrabiarek CNC, błędów

pozycjonowania, błędów wywołanych odkształceniami, błędów wywołanych obciążeniami eksploatacyjnymi, błędów wrzeciona i ustawienia przedmiotu obrabianego, błędów wywołanych właściwościami układu sterowania. W rozdziale tym przedstawiono także przegląd literatury dotyczący montażu obrabiarek numerycznych.

W rozdziale drugim podano okoliczności sformułowania tematu pracy. Przedstawiono także cele i hipotezy pracy oraz zakres pracy. Jako cele przyjęto opracowanie sposobu poprawy dokładności montowanych obrabiarek, wykorzystującego wyniki pomiarów obrobionych powierzchni roboczych jej korpusów składowych. Sformułowanie hipotez pracy jest niepotrzebnie zagniatwane przez co jest nieprzejrzyste. Można było poprzestać na jednej hipotezie, która mogłaby brzmieć następująco: „Możliwy jest taki dobór elementów korpusowych z danej populacji, tworzących układ nośny obrabiarki dla których zamierzone są i wobec tego są znane niedokładności wykonania powierzchni roboczych aby wynikowy błąd przestrzennego pozycjonowania był jak najmniejszy”.

W rozdziale trzecim omówiono model błędu objętościowego wybranej struktury geometryczno-ruchowej obrabiarki sterowanej numerycznie. Przedstawiono sposób generowania struktur geometryczno-ruchowych, których może być bardzo dużo. Dlatego w rozprawie skoncentrowano się na wybranych SG-R aktualnie produkowanych przez firmę DMG MORI obrabiarkach (są to centra frezarskie rodziny CMX V).

W procedurze modelowania błędów objętościowych zastosowano notację Denevita-Hartenberga. Ideę tę zaczerpnięto z prac [55, 81, 85]. W opisie do przytoczonych na str. 40 wzorów (3.2) i (3.3) występuje niekonsekwencja. W opisie do wzoru (3.2) macierz  ${}^{m-1}T_m$  przekształcenia jednorodnego transformuje punkty z układu m-1 do punktu m, natomiast w opisie do wzoru (3.3) transformuje punkty z układu m do układu m-1, czyli odwrotnie. Również do wzoru (3.8) na str. 41 zakradł się błąd. Po prawej stronie wyrażenia (3.8) powinien występować iloczyn dwóch macierzy  ${}^{m-1}T_m^{rot} * {}^{m-1}T_m^{trans}$

W części rozdziału trzeciego omawiającej wpływ poszczególnych błędów kinematycznych obrabiarki na wartość maksymalnego błędu objętościowego w przestrzeni roboczej w wyjaśnieniu do wzoru (3.31), (3.32) i (3.33) na str. 48 i 49 użyto sześciokrotnie symbolu  $l_{xmin}$  co jest ewidentną pomyłką. Ilościowy wpływ poszczególnych parametrów opisujących błąd objętościowy oceniano za pomocą wskaźnika wrażliwości, zaproponowanego w monografii [47]. Wskaźnik ten, wywodzący się z teorii wrażliwości, jest stosowany do określania ilościowego wpływu parametrów opisujących analizowaną funkcję na jej wartość.

W podsumowaniu rozdziału trzeciego przedstawiono wyniki badań symulacyjnych zaproponowanego modelu błędu objętościowego rozważanej w rozprawie obrabiarki. Obliczenia wykonano dla 5 losowo wybranych obrabiarek. Stwierdzono, że uprzednio wspomniany wskaźnik wpływu (wrażliwości) może być bardzo użytecznym narzędziem identyfikacji wpływu poszczególnych

błędów kinematycznych na wartość błędu objętościowego w przestrzeni roboczej (konfiguracyjnej) obrabiarki. Autor rozprawy słusznie zauważył, że zagadnienie wpływu błędów składowych na wynikowy błąd objętościowy wymaga dalszych badań w kierunku wypracowania metody znajdowania najkorzystniejszego doboru montowanych korpusów z punktu widzenia dokładności obrabiarki.

W rozdziale czwartym omówione jest modelowanie połączenia prowadnicowego wózek toczny-szyna z elementami tocznymi w postaci kulek i wałeczków z uwzględnieniem odkształcalności elementów tworzących połączenie oraz błędów wykonania powierzchni roboczych korpusowych z którymi współpracują toczne połączenia prowadnicowe. Opracowano uproszczony model zespołu posuwowego uwzględniający oddziaływanie obciążeń zewnętrznych, wpływ niedokładności wykonania powierzchni roboczych kojarzonych korpusów oraz wpływ śruby tocznej a także odkształcalność elementów korpusowych. Na str. 68 i 69 zamieszczono dwa różne rysunki (4.8 i 4.9), które zaopatrzone tym samym podpisem. Dlaczego? Stopień uproszczenia rys. 4.7 ÷ 4.9 jest nadmierny przez co informacja przekazywana przez nie jest mizerna. W tekście na str. 71 i 73 zamieszczono dwa różne rysunki opatrzone tym samym numerem 7.12, przez co nie ma rys. 7.11.

W rozdziale czwartym przedstawiono także wyniki doświadczalnych badań weryfikacyjnych polegających na pomiarze prostoliniowości przesuwu zespołu posuwowego wrzeciennika oraz sań Y. Pomiar wykonano dla trzech zespołów wrzeciennika i trzech zespołów sań Y. Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń uzyskanych na podstawie obliczeń wykonanych z zastosowaniem opracowanego i przedstawionego w rozprawie modelu pokazano na rys. 4.16 i 4.17. Ich zgodność jest praktycznie zadowalająca.

Rozdział piąty poświęcony jest algorytmom doboru korpusów obrabiarek ze względu na dokładność geometryczną. Rozpatrzono algorytmy przeszukiwania systematycznego i losowego oraz algorytmy metaheurystyczne - symulowanego wyżarzania i genetyczny. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych skuteczności rozpatrywanych algorytmów w problemie doboru korpusów w procesie montażu obrabiarki. Na podstawie uzyskanych wyników wykazano, że zastosowanie algorytmu losowego przeszukiwania jest korzystniejsze ze względu na prostotę, krótszy czas obliczeń i lepsze ilościowo wyniki. Porównanie skuteczności wszystkich czterech rozpatrywanych algorytmów w odniesieniu do algorytmu systematycznego przeszukiwania przedstawiono na rys. 5.20 i 5.21. Najlepszy wynik dla średniego błędu  $e_{max}$  uzyskano przy zastosowaniu algorytmu symulowanego wyżarzania, zaś ze względu na czas obliczeń dla algorytmu losowego przeszukiwania. Komentarz do uzyskanych wyników jest bardzo skromny.

W rozdziale piątym na str. 80, 14 wd napisano ... co wynika z różnej geometrii obrobionych błędów ... Co oznacza określenie „geometria obrobionych błędów”?

W zakończeniu sformułowano wnioski podsumowujące uzyskane wyniki oraz wytyczono kierunki dalszych badań. Stwierdzono, że cel badań został osiągnięty i postawione hipotezy zostały udowodnione.


Rozprawa doktorska mgr. inż. Tomasza Bartkowiaka ma charakter teoretyczno-aplikacyjny. Jej wyniki mogą być wdrożone do praktyki przemysłowej. Opracowanie redakcyjne rozprawy jest na dobrym poziomie, chociaż korekta nie została dokonana z należytą uwagą. Chciałbym autorowi zaproponować aby na przyszłość rozróżniał pojęcia „wielkość” i „wartość”, których używał w tekście zamiennie. Na przykład na str. 50, 6wd jest ...wielkość maksymalnego błędu objętościowego a powinno być ... wartość maksymalnego błędu objętościowego ... .

Rozprawę doktorską mgr. inż. Tomasza Bartkowiaka oceniam pozytywnie. Sformułowane w mojej Opinii uwagi w niczym nie umniejszają tej oceny. Rozprawa ta wnosi wartościowy wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie *budowa i eksploatacja maszyn* a szczególnie w rozwój wiedzy w zakresie technologii mechanicznej.

### **3. Ocena końcowa**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Tomasza Bartkowiaka spełnia wymagania Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki i może stanowić podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora w dziedzinie *nauki techniczne* w dyscyplinie *budowa i eksploatacja maszyn*.

Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Tomasza Bartkowiaka do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters, likely belonging to the reviewer or the author.