

dr hab. inż. Arkadiusz Parus
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Instytut Technologii Mechanicznej

OPINIA

o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Konrada Gaca pt. „Sterownik robota hybrydowego do frezowania”

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Wysoka konkurencja wśród producentów wyrobów wymusza poszukiwania coraz to bardziej efektywnych ekonomicznie metod wytwarzania przedmiotów. Oferowane wyroby muszą przy tym sprostać ostrym kryteriom dotyczącym jakości ich wykonania. Oba wymienione czynniki – zmniejszenie kosztów wytwarzania i podniesienie jakości oferowanych wyrobów – mają przeciwstawny charakter i są trudne do pogodzenia w trakcie produkcji. Zastosowanie technologii *HSM* (ang. *High Speed Machining*) wydaje się być jedną z technik pozwalających na spełnienie obu kryteriów. Zastosowanie specjalnych narzędzi skrawających, pracujących z prędkością obrotową rzędu 100 tys. obr./min i więcej, pozwala znacząco zwiększyć prędkość skrawania, skracając tym samym czas wykonania przedmiotu na maszynie *CNC* (ang. *Computerized Numerical Control*). Wysoka prędkość obrotowa prowadzi równocześnie do obniżenia sił skrawania, ze względu na zmniejszenie przekroju warstwy skrawanej. W rezultacie układ *OUPN* (obrabiarka – uchwyt – przedmiot – narzędzie) pracuje pod mniejszym obciążeniem, co umożliwia uzyskanie większej precyzji obróbki. Aspekt ten jest szczególnie istotny w obszarze dynamiki konstrukcji obrabiarki oraz procesu skrawania. Niższe siły w trakcie obróbki prowadzą do redukcji poziomu drgań zarówno narzędzia skrawającego i obrabianego przedmiotu jak i elementów obrabiarki. W rezultacie zwiększa się stabilność obróbki i zmniejsza się możliwość wystąpienia drgań samowzbudnych. Korzystne cechy *SHM* powodują, że technologia ta jest coraz częściej stosowana – jednak wymaga od obrabiarki wysokiej dynamiki ruchu elementów korpusowych w trakcie obróbki, w celu zapewnienia prawidłowej realizacji trajektorii przy dużych prędkościach posuwowych. W przypadku tradycyjnej obrabiarki *CNC* pracującej w technologii *SHM* do 70% energii układu

napędowego może być używane na wykonanie ruchów posuwowych elementów korpusowych obrabiarki. W związku z tym poszukiwane są konstrukcje o wystarczająco dużej sztywności, w których przemieszczane są elementy o zdecydowanie niższej masie niż w konwencjonalnej obrabiarce CNC. Jedną z możliwości jest zastosowanie układów o kinematyce równoległej, w których wysoka sztywność jest osiągana przy znacznie niższej masie. Zasadniczą trudnością w zastosowaniu układów o kinematyce równoległej jest dużo bardziej skomplikowany sposób sterowania oraz silna zmienność sztywności konstrukcji w zależności od konfiguracji geometrycznej układu. Wysoka prędkość ruchu narzuca wysokie wymagania odnośnie interpolacji ruchu, uwzględnienia ograniczeń maksymalnych przyspieszeń i prędkości osiąganych przez poszczególne napędy oraz konieczność przeprowadzenia obliczeń kinematyki układu w czasie rzeczywistym. Wszystkie te czynniki sprawiają, że komercyjnie oferowane rozwiązania układów sterowania CNC, nie zapewniają optymalnego wykorzystania możliwości konstrukcji o kinematyce równoległej, a w większości wypadków się do tego celu zupełnie nie nadają.

Autor rozprawy podjął ambitną próbę opracowania prototypu układu sterowania robotem o kinematyce równoległej, umożliwiającego wykonanie niezbędnych obliczeń w czasie rzeczywistym z częstotliwością 10kHz w oparciu o układy *FPGA* (ang. *Field Programmable Gate Array*).

Tematykę rozprawy uważam za aktualną, a opracowane rozwiązanie za wartościowe. Zastosowanie układów o dużej mocy obliczeniowej pozwala w przyszłości na rozszerzenie funkcjonalności opracowanego rozwiązania o nowe czynniki.

2. Charakterystyka rozprawy i jej merytoryczna ocena

Rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów oraz bibliografii. Praca łącznie liczy 178 stron. W rozdziale pierwszym Autor krótko nakreślił tło rozprawy wraz z odnośnikami do aktualnego stanu literatury.

W drugim rozdziale nakreślił motywację do podjęcia tematu oraz przedstawił cel i tezę pracy. W rozdziale tym również omówiona jest struktura pracy i przedstawiono najważniejsze osiągnięcia.

Rozdział trzeci przedstawia stan zagadnienia sterowania ruchem (w tym sterowania obrabiarek CNC) na podstawie przeglądu literatury. Przedstawione zostały podstawowe informacje dotyczące konwencjonalnych rozwiązań sterowań CNC dostępnych komercyjnie wraz z przeglądem platform sprzętowych.

Rozdział czwarty dotyczy metod stosowanych przy projektowaniu sterowników. Znaczną część rozdziału zajmuje opis metody klasycznej i współbieżnej implementacji algorytmów w układach *FPGA*.

Rozdział piąty poświęcony jest w całości opisowi prototypu robota o kinematyce równoległej przeznaczonego do frezowania. Krótko przedstawiona jest struktura geometryczno-ruchowa robota, opis układu napędowego. Opisany został również stół uchylny-obrotowy zastosowany w konstrukcji. Dla opisanej konstrukcji wyznaczona została przestrzeń robocza. Podane zostało analityczne rozwiązanie zagadnienia odwrotnego i prostego kinematyki robota. W końcowej części rozdziału przedstawiony został algorytm sterowania wykorzystujący model obiektu. Opisany został algorytm generowania i śledzenia trajektorii.

Zaproponowany przez Autora układ sterowania robotem przedstawiony jest w rozdziale szóstym. Pokazana została jego struktura wraz z podziałem na bloki funkcjonalne, które zostały szczegółowo opisane. Podział układu na bloki został dokonany z uwzględnieniem czasu potrzebnego na ich realizację. Z tego względu występuje część on-line i off-line, której wykonanie nie jest krytyczne czasowo. Szczegółowo opisane zostały procedury kalibracji czujników położenia.

W rozdziale siódmym przedstawione zostały rozwiązania warstwy sprzętowej i implementacji na niej układu sterowania. Jest to najważniejszy rozdział w pracy. Autor przedstawia w nim rozwiązania warstwy sprzętowej i uzasadnia wybór platformy z układem Stratix III oraz Cyclone IV E. Krótko omówione zostały narzędzia softwarowe wykorzystane do programowania ww. układów. Szczegółowo opisano stałoprzecinkową część układu sterowania oraz pierwszy zbudowany prototyp. Wykonywanie obliczeń zmiennoprzecinkowych było wspomagane przez bloki sprzętowe stanowiące instrukcje koprocesora dla zaimplementowanego w strukturze *FPGA* procesora soft-core NIOS II. Końcowa część rozdziału poświęcona jest opisowi drugiego prototypu sterownika, w którym obliczenia zmiennoprzecinkowe realizowane są w oparciu o opracowane przez Autora sprzętowe bloki funkcyjne. Rozdział kończy porównanie czasu obliczeń koniecznych do zrealizowania przykładowej trajektorii dla opracowanych prototypów układu sterowania na strukturach *FPGA* oraz mikroprocesorami z rdzeniem CORTEX M3 i M4 oraz procesorem sygnałowym DSP.

Rozprawę zamyka rozdział ósmy, w którym Autor podsumowuje uzyskane rezultaty i przedstawia propozycje kierunków dalszych prac nad udoskonaleniem opracowanego rozwiązania.

Do wartościowych i oryginalnych osiągnięć rozprawy, stanowiących wkład w rozwój nauki w zakresie rozwoju metod sterowania CNC układów o strukturze równoległej, zaliczyć należy:

- opracowanie i implementacja algorytmu systemu CNC w strukturze FPGA z uwzględnieniem podsystemów kalibracji i zabezpieczeń frezarki,
- modyfikacja istniejących metod obliczeń zmiennoprzecinkowych z zastosowaniem instrukcji pełniących funkcję koprocesora dla procesora typu soft-core NIOS II, zaimplementowanych w pierwszym prototypie opracowanego układu,
- opracowanie sprzętowych bloków funkcyjnych pełniących rolę akceleratora obliczeń zmiennoprzecinkowych, zaimplementowanych w drugim prototypie opracowanego układu,
- przeprowadzenie badań potwierdzających przydatność opracowanych rozwiązań do sterowania CNC maszyn o strukturze równoległej.

Autor nie ustrzegł się pewnych niedociągnięć:

1. W opiniowanej rozprawie część zagadnień przedstawione jest w sposób utrudniający rozeznanie czy opisywane zagadnienie zostało opracowane przez Autora, czy też jest częścią istniejącego już stanowiska badawczego (np. równania 5.5.4-5.5.13).
2. Praca od strony redakcyjnej napisana jest na dobrym poziomie lecz wymaga ona dopracowania. Zdarzają się „literówki” nawet w tytułach podrozdziałów (np. 6.2.2).
3. Na str. 93 w punkcie 3 wyszczególniony jest podpunkt 3a. Nie ma kontynuacji w postaci punktu 3b, a treść całego akapitu jest niejasna.
4. Zastosowane formatowanie spisu treści jest dość nieszablonowe, a występujący w nim skrót X-ZJN jest rozszyfrowany dopiero na 12 stronie rozprawy.
5. Rysunek nr 17 mógłby być lepszej jakości.
6. We wstępie pracy Autor pisze: „Dla szeregowych struktur kinematycznych, najczęstszą metodą uzyskania wysokiej sztywności maszyny, jest zwiększenie masy jej elementów”. Sformułowanie to jest dalece dyskusyjne, ponieważ wzrost masy to skutek uboczny zwiększenia sztywności, a nie cel sam w sobie.
7. Przyspieszenia na poziomie 1G są dostępne na klasycznych maszynach CNC. Wymagania w przypadku HSM są zdecydowanie większe (str.10).

8. Na str. 30 Autor pisze: „W opracowanym manipulatorze, dzięki szczególnemu doborowi pewnych wymiarów konstrukcyjnych, problem ten nie występuje i można łatwo uzyskać analityczne rozwiązanie”. Na czym polega wspomniany dobór parametrów i jak wpływa na uzyskane rozwiązanie?
9. Na str. 39 Autor pisze: „... i nieliniowe charakterystyki napędów”. Na czym polega i jaki charakter ma wspomniana nieliniowość. W dalszej części pracy Autor opisując konfigurację sprzętową wyjaśnia, że napędy są sterowane w trybie momentowym, co w znacznym stopniu niweluje wpływ, zazwyczaj nie do końca znanych, elementów w strukturze układu regulacji.
10. Równanie 5.4.1 przedstawia zasadę działania układu sterowania. Występuje w nim symbol $s_c(t)$, którego rola nie jest wyjaśniona w podpisie. Zamiast niego występują: $s(t)$ oraz s_c – których brak jest we wzorze 5.4.1.
11. Z jakiego powodu zdecydowano się na „nieliniową całkę” w celu kompensacji błędu nawrotu. W układach CNC błąd nawrotu określany jest jako „backlash” i kompensowany jest po stronie wartości zadanej położenia.
12. Jak należy rozumieć zwrot „... chwilowego przyspieszenia liniowego dla ruchu rotacyjnego”? (str. 52)
13. Zastosowanie przyrostowych czujników pozycji wiąże się z koniecznością zrealizowania procedury bazowania. Do określenia pozycji stołu uchylnobrotowego zastosowano czujniki bezwzględne HH RCN226. Na czym dokładnie polega procedura „inicjalizacji i kalibracji czujników położenia” w tym przypadku?
14. Jaka wartość i jaką rolę pełni stała s_{36R} we wzorze 7.4.1? Dlaczego równanie ma taką postać, a nie $\text{abs}(e_2^2 - e_3^2)$? We wzorze 7.4.3 również występuje bliżej nie zdefiniowana stała.
15. W rozdziale 7.4.5 opisana jest procedura wyznaczania wartości chwilowej prędkości na podstawie pomiaru czasu pomiędzy kolejnymi impulsami czujnika położenia. Czy nie obserwował Autor problemów z wyznaczeniem prędkości wg tej metody w przypadku powolnych ruchów obrabiarki?
16. Na stronie 124 Autor wspomina o konieczności wyłączenia procedury dzielenia zmiennoprzecinkowego dostarczonej przez producenta układu. Jaka była przyczyna takiego postępowania?
17. Sterowanie w trybie momentowym jest prawdopodobnie „najszybszą” metodą tj. zapewniającą największą dynamikę sterowania napędem. Kolejnym etapem jest

bezpośrednie sterowanie kluczy tranzystorowych, co przeważnie jest niedostępne w większości układów komercyjnie dostępnych układów napędowych. Autor zadaną wartość momentu przekazuje do napędu za pośrednictwem magistrali CanOpen. Z jaką prędkością pracowała magistrala i czy opóźnienia wynikające z wyboru tej metody nie mogą mieć istotnego wpływu na uzyskiwane rezultaty?

Pomimo uprzednio sformułowanych, często o charakterze dyskusyjnym, uwag całość rozprawy należy ocenić pozytywnie. Autor podjął się aktualnego tematu, sformułował jasno cel pracy. Zaimplementował złożony obliczeniowo algorytm w strukturze FPGA, opracował własne procedury mające za zadanie przyspieszenie wykonywania obliczeń. Opiniowana rozprawa ma charakter typowo aplikacyjny. Autor wykazał się dużym doświadczeniem w konstruowaniu i projektowaniu systemów mikroprocesorowych i FPGA. Szczególnie wartościowy jest ostatni rozdział pracy, w którym Autor szczegółowo przedstawiono kolejne etapy pracy nad implementacją układu sterowania CNC. Należy docenić duży nakład pracy poświęcony na rozwiązanie problemów technicznej implementacji poszczególnych etapów algorytmu.

3. Końcowa ocena rozprawy

Końcowa ocena rozprawy doktorskiej mgr. inż. Konrada Gaca jest w pełni pozytywna. Autor wykazał się teoretyczną i praktyczną wiedzą z zakresu układów sterowania CNC, metod sterowania ruchem, generowania trajektorii, implementacji algorytmów w strukturach mikroprocesorowych z wykorzystaniem układów typu FPGA. Potrafi samodzielnie określić źródło problemu, a następnie zaproponować sposób jego rozwiązania. Tym samym udowodnił, że jest dobrze przygotowany do samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Przedstawiona do recenzji praca zasługuje na wyróżnienie.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr. inż. Konrada Gaca spełnia wszystkie wymagania odpowiedniej ustawy O Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Andrzej Poczta