

dr hab. inż. Marcin Kamiński, prof. PWR

Wrocław, 2019-05-17

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Wydział Elektryczny

Politechnika Wrocławska

ul Smoluchowskiego 19

50-372 Wrocław

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Waszczuka

pt. Zwiększenie dynamicznej sztywności zespołu posuwowego obrabiarki

poprzez wykorzystanie struktury sterowania

zawierającej nominalny liniowy model

opracowana na zlecenie

Dziekana Wydziału Elektrycznego

Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

1. Charakterystyka zagadnień analizowanych w rozprawie

Nowoczesne serwomechanizmy, stosowane w zastosowaniach przemysłowych, powinny charakteryzować się wysoką precyzją odtwarzania zadanej zmiennej stanu, zmniejszaniem czasu ustalania na poziomie zadanym, odpornością na zmiany parametrów obiektu oraz inne zakłócenia zewnętrzne. Powyższe założenia są niezwykle istotne w odniesieniu do obrabiarek CNC stosowanych w etapach procesu wykonawczego, gdzie mają bezpośrednie przełożenie na finalny efekt działania urządzenia (jakość realizacji zadania) oraz wydajność produkcji. Jedną z głównych wytycznych, w trakcie realizacji zadań pracy doktorskiej, było bazowanie na napędzie elektrycznym z silnikiem PMSM. Maszyny tego typu stanowią grupę (często wybieranych) urządzeń wykonawczych w systemach automatyki przemysłowej. Ze względu na uzyskiwane właściwości dynamiczne, bardzo dobrze wpasowują się do wymagań dotyczących pracy doktorskiej.

Należy zwrócić uwagę, że sterowany obiekt (obrabierka CNC) stanowi znaczące utrudnienie dla precyzyjnego sterowania prędkością lub położeniem. Jest to związane z zakłóceniami wynikającymi z konstrukcji części mechanicznej napędu. Dlatego Autor

analizuje wpływ luzu połączenia, tarcia silnika oraz sprężystości elementów łączących zestawu. Przy wymaganiach dotyczących krótkich czasów ustalania się kontrolowanej zmiennej stanu na wartości odpowiadającej sygnałowi referencyjnemu, w układach regulacji wprowadzane są duże nastawy regulatorów. W efekcie, wymienione czynniki mogą być źródłem powstawania oscylacji zmiennej stanu. W takiej sytuacji uzyskanie wysokiej jakości sterowania jest trudne do zrealizowania, szczególnie przy zastosowaniu regulatorów klasycznych (typu PI/PID). Analizując dostępną literaturę, możliwe jest zaobserwowanie podstawowych sposobów sterowania napędami o złożonej części mechanicznej. Pierwsza z nich polega na korektach wykonawczych części mechanicznej (filtry, zastosowanie sprzęgieł wykonanych z innych materiałów, etc.). Kolejna grupa dotyczy modyfikacji nastaw regulatorów, jednak najczęściej jest to związane z osłabianiem dynamiki układu. Następnie, w celu tłumienia drgań w napędach elektrycznych, stosowane są nowoczesne algorytmy sterowania (np. oparte o metody sztucznej inteligencji). Jednak w tym przypadku należy podkreślić złożoność algorytmów, która utrudnia analizę oraz aplikacje sprzętowe. Jednym z najkorzystniejszych, prostych oraz bardzo efektywnych rozwiązań, jest stosowanie zmodyfikowanych klasycznych układów regulacji. Zmiany polegają na wprowadzaniu dodatkowych sprzężeń od zmiennej stanu, charakterystycznych dla układów wielomasowych lub zastosowaniu kompensatorów. Rozważane w doktoracie rozwiązanie, można ulokować w ostatniej z wymienionych grup. W recenzowanej rozprawie doktorskiej analizie poddano układ regulacji z dodatkowym modelem wewnętrznym (*Model Based Control*). Zastosowano hybrydową strukturę sterowania, w której poza głównym torem, wprowadzono dodatkowy model obiektu. Celem takiej konstrukcji jest wykrywanie zakłóceń, które powinny zostać wyeliminowane/kompensowane poprzez dodatkowy regulator. W ten sposób możliwe jest uzyskanie poprawnego działania maszyny w obecności utrudnień wynikających z budowy oraz połączeń elementów zespołu posuwowego.

Istotnym przedmiotem badań, w pracach związanych z doktoratem, jest oryginalna część aplikacyjna. Następnie wykonano weryfikację eksperymentalną rozważanych układów regulacji. W tym zakresie, szczególna uwaga powinna zostać zwrócona na zastosowane narzędzia programistyczne. Algorytm został zaimplementowany w sterowniku za pomocą języka programowania wysokiego poziomu, stosującego graficzne łączenie elementów oraz konfigurację przepływu danych. W ten sposób, zgodnie z obecną tendencją obserwowaną w ośrodkach badawczych na całym świecie, uzyskano zdecydowane skrócenie czasu pomiędzy etapem symulacyjno-projektowym a rzeczywistymi eksperymentami.

Tematyka opisana w rozprawie doktorskiej została dobrana bardzo poprawnie, stanowi oryginalną koncepcję rozwiązania ważnego zadania praktycznego. Poza aplikacją algorytmu sterowania maszyną CNC, odpowiednio wykorzystano nowoczesne metody projektowania oraz testowania układów sterowania. W związku z tym, zgodnie z moją opinią, opisane w rozprawie doktorskiej zagadnienia odnoszą się do aktualnie najistotniejszych, prezentowanych w artykułach publikowanych w renomowanych czasopismach oraz materiałach konferencyjnych, problemów związanych z Automatyką i Robotyką.

2. Koncepcja rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska została rozmieszczona na 163 stronach. Konstrukcja opisu uwzględnia 11 rozdziałów. Jedną z ostatnich części stanowi spis literatury załączonej w celu prezentacji stanu badań w niniejszej tematyce (załączono 162 pozycje). Dodatkowo udostępniona została płyta DVD-R zawierająca komplet materiałów. Przyjęta struktura opracowania została dobrana właściwie, kolejne rozdziały stanowią logiczną całość.

Pierwszy rozdział przedstawia podstawowe założenia pracy doktorskiej. Teza, składająca się z dwóch składowych cząstkowych została sformułowana następująco:

„Wysoka jakość regulacji prędkości zespołu posuwowego obrabiarki z napędem śrubowym kulowo-tocznym, wyrażona poprzez wysoką wartość sztywności dynamicznej w całej przestrzeni roboczej może być zapewniona poprzez zastosowanie nominalnego liniowego modelu dynamicznego zespołu posuwowego w ramach bloku korekcji, w strukturze sprzężenia prądowego wprzód. Dzięki zastosowaniu algorytmu bazującego na podejściu charakterystycznym dla MFC/IMC nie ma konieczności modyfikacji struktury wewnętrznej układu regulacji dostępnego w typowych rozwiązaniach cyfrowych serwonapędów.”

Generalnie, dwie pierwsze części prezentują przegląd literatury dotyczącej zagadnień charakterystycznych dla urządzeń CNC. Szczególnie zaznaczone zostały struktury sterowania implementowane dla obrabiarek oraz specjalne funkcje stosowane w celu poprawy jakości działania w specyficznych przypadkach (kompensacja wpływu luzu w połączeniach elementów sprzęgających, diagnostyka, etc.), które są obecnie stosowane przez czołowych producentów tych urządzeń. Opisano podstawowe właściwości oraz uzasadniono zastosowanie w projekcie siników PMSM. Rozdział trzeci przedstawia model matematyczny sterowanego obiektu. Poza maszyną elektryczną, zaprezentowano bardzo dokładnie zjawiska występujące w rozbudowanej części mechanicznej. Warto podkreślić, że wybrane fragmenty

zostały zobrazowane poprzez przykłady skryptów Matlab. Następny rozdział, przedstawia dokładny opis oraz syntezę regulatora MFC/IMC. Według mnie, jest to najbardziej wartościowy rozdział części teoretycznej, stanowi oryginalny wkład Autora do tematyki związanej z doktoratem. W rozdziale piątym zamieszczono wyniki badań symulacyjnych. Uprzednio opisane zostały warunki realizacji testów obliczeniowych oraz biblioteki języka programowania opracowane na potrzeby pracy doktorskiej. Rozdział szósty zawiera szczegóły konstrukcyjne stanowiska laboratoryjnego oraz rezultaty badań eksperymentalnych. Jest to sekcja, która w sposób znaczący podnosi ocenę końcową pracy doktorskiej. W następnym rozdziale opisano poszczególne etapy projektowania bloku korekcyjnego z liniowym modelem obiektu, zastosowanego w pętli sprzężenia prędkościowego układu sterowania położeniem serwomechanizmu. Po czym, w części podsumowującej, Autor podkreślił, że tezy pracy doktorskiej zostały udowodnione poprzez symulacje oraz eksperyment. Ponadto, zaznaczono uniwersalność zaproponowanej aplikacji dla podobnych obiektów. Zaproponowane zostały również kierunki rozwoju, które mogą stanowić kontynuację badań. Trzy ostatnie rozdziały opisu pracy doktorskiej (bibliografia, spis rysunków, spis tabel) stanowią istotne uzupełnienie w konstrukcji tego typu opracowań.

Analizując otrzymane opracowanie należy stwierdzić, że mgr inż. Paweł Waszczuk, wykazał się bardzo dobrą znajomością złożonych układów napędowych, potrafi zdefiniować problem naukowo-badawczy, a także zaproponować rozwiązanie wykorzystujące odpowiednie narzędzia i metody.

3. Ocena pracy

3.1. Oryginalne osiągnięcia

Wśród najważniejszych (oryginalnych) osiągnięć, opisanych w rozprawie doktorskiej, należy wymienić elementy, które zostały poniżej zapisane.

- >Zaprojektowanie równoległego regulatora, zawierającego dodatkowy człon korekcyjny, dla obrabiarki CNC.
- >Przeprowadzenie, w szerokim zakresie, badań obliczeniowych, które uwzględniały, między innymi, wpływ zmian parametrów obiektu na precyzję regulacji oraz testy porównawcze (przedstawiające wpływ modyfikacji najczęściej stosowanych struktur sterowania z regulatorami PI/PID).
- >Opracowanie systematycznej metodyki projektowania bloku korekcyjnego, zawierającego liniowy nominalny model obiektu, który został zastosowany w pętli sterowania prędkością.

>Dobór oryginalnego rozwiązania sprzętowego dla realizacji obliczeń analizowanego algorytmu sterowania, a także przeprowadzenie obszernych testów eksperymentalnych na stanowisku laboratoryjnym.

3.2. Uwagi redakcyjne

Rozprawa doktorska została opracowana bardzo starannie, elementy graficzne zostały bardzo dobrze wykonane. Jednak Autor nie ustrzegł się nieznaczących błędów edytorskich oraz językowych, których przykłady zostały poniżej przedstawione.

>Strony 2 oraz 13, w tytule rozdziału zapisano: „sterownia”.

>Strona 26, ostatni akapit, błędnie wpisano: „wykorzaystanie”.

>Strona 9, 3 akapit, drobny błąd w wyrazie: „dostep”.

>Strona 14, popełniona została literówka: „miarowego pokazującego aktualne”.

>Na rysunku 3.2 wprowadzono opis w języku angielskim („Encoder”).

>Rysunki 2.9-2.11 zawierają zwroty w języku angielskim.

>Strona 19, zastosowano określenie „na komputer”, które nie powinno pojawiać się w tego typu opracowaniach.

>Strona 20, symbol „ Θ ” nie został wyjaśniony.

>Strona 21, błędny zapis w wyrazie: „relatywie”.

>Strona 24, popełniono błąd interpunkcyjny: „w, którym”.

>Strona 26, zawiera fragment: „przekroczy wyzaczone przez krzywe”.

>Strona 26, uwzględniono: „odzwierciedlającej ktyterium minimalizacji”.

>Strona 29, zawarto błąd we fragmencie: „opracowań modeli silników elektrycznych”.

>Strona 110, błędnie wpisano: „sterowania dla nominalnego medelu”.

>Strona 162, poprawy wymaga: „pomiędzy prędkością aktualną zmiarzoną podczas eksperymentu”.

>Na stronie 3 oraz 139 pojawiła się literówka: „posuwowego wraz z procedurą indentyfikacji”.

>Strony 115 oraz 162, należałoby poprawić zapis: „zmiarzoną podczas eksperymentu”.

Należy zaznaczyć, że wymienione błędy nie utrudniają odbioru merytorycznego przekazu opracowania, nie mają również wpływu na ostateczną – bardzo dobrą – ocenę pracy doktorskiej.

3.3. Uwagi merytoryczne

Na podstawie szczegółowej analizy rozprawy doktorskiej, przedstawiam uwagi merytoryczne o charakterze ogólnym oraz szczegółowym.

1. W pracy zastosowano, zgodnie z trendem obserwowanym obecnie w rozwiązaniach inżynierskich, implementację algorytmu sterowania w układzie programowalnym, przy wykorzystaniu graficznego języka programowania (Matlab/Simulink). Czy korzyść, polegająca na uproszczeniu procesu aplikacji, nie powodowała strat związanych z częstotliwością obliczeń? Czy porównywano uzyskaną wydajność kodu z implementacją wykonaną w innym języku programowania (np. C++)? Czy krok obliczeniowy stanowi istotny wpływ na działanie analizowanego układu regulacji?
2. Badany serwomechanizm posiada kaskadową strukturę, w której można wyodrębnić trzy pętle sterowania dotyczące kolejnych zmiennych stanu: położenia, prędkości oraz prądu. W wielu przypadkach, przy założeniu ograniczonej dynamiki wymuszanej w napędzie oraz zdecydowanie szybszym przetwarzaniu w części prądowej, w trakcie projektowania regulatora prędkości podrzędny układ sterowania jest pomijany. Jaki jest wpływ opóźnień pętli kształtowania momentu elektromagnetycznego, w badanym napędzie, na uzyskiwane wyniki?
3. Zastosowanie sterowania opartego o model obiektu umożliwiło zdecydowaną poprawę uzyskiwanych właściwości układu napędowego w porównaniu do klasycznego rozwiązania. Czy rozważano również wprowadzenie modelu obiektu, w części korekcyjnej, realizującego predykcję zachowania silnika napędowego?
4. Naturalnie, w rzeczywistych układach napędowych należy wprowadzać ograniczenia dla pętli kształtowania momentu elektromagnetycznego. Jak zostały zrealizowane limity prądu w testowanym regulatorze MFC/IMC? Czy struktura sterowania działa poprawnie w zakresie ograniczeń?
5. Teoretycznie można założyć przypadek działania obu regulatorów (głównego oraz korekcyjnego), w którym oba tory regulacji wymuszają różny poziom dynamiki układu (bardzo duże rozbieżności nastaw). Rozważana w pytaniu sytuacja jest analogiczna do tej, kiedy w trakcie projektowania obserwatora zmiennych stanu zakłada się, że powinien być co najmniej kilka razy szybszy od regulatora. Czy wspomniany problem był brany pod uwagę w trakcie projektowania regulatora bazującego na modelu obiektu? Czy dynamika regulatora głównego jest na poziomie odpowiednika zamieszczonego w części korekcyjnej?
6. Interesujące wydają się wyniki badań symulacyjnych (analogiczne do zaprezentowanych na rysunkach w tabelach 5.2 oraz 5.3), wykonane dla innej trajektorii zadanej ω_{zad} , wprowadzającej dynamiczne zmiany stanu pracy napędu.

7. Czy nadzorowanie pracy rzeczywistego napędu (badania eksperymentalne) wymagało dodatkowej aplikacji realizującej wirtualny panel operatorski? Jak przeprowadzono rejestrację danych pomiarowych?

4. Ostateczna konkluzja

W oparciu o otrzymaną rozprawę doktorską, wszelkie aspekty koncepcyjne oraz wykonawcze, a także oryginalne osiągnięcia badań, poniżej zdefiniowano ostateczne punkty podsumowujące przedstawionej recenzji.

- Recenzowana rozprawa doktorska, Pana mgra Pawła Waszczuka, spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z obowiązującą ustawą o tytule i stopniach naukowych.
- Wnoszę wniosek o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony oraz przyjęcie jej przez Radę Wydziału Elektrycznego Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.
- Analizując zakres oraz jakość wykonanych prac, a także przedstawione wyniki badań wnioskuję również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Marcin Kaniński

