



dr hab. inż. Dariusz Horla
Instytut Automatyki, Robotyki i Inżynierii Informatycznej
Wydział Elektryczny
Politechnika Poznańska

Poznań, dnia 8. maja 2019r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Zwiększenie dynamicznej sztywności zespołu posuwowego obrabiarki poprzez wykorzystanie struktury sterowania zawierającej nominalny liniowy model**

Autor rozprawy: **mgr inż. Paweł Waszczuk**

Promotor rozprawy: **dr hab. inż. Krzysztof Pietrusewicz, prof. ZUT**

Dziedzina: **nauki techniczne**

Dyscyplina: **Automatyka i Robotyka**

1. Uwagi ogólne

Zagadnienia rozpatrywane w opiniowanej rozprawie dotyczą sterowania serwonapędami stosowanymi w zastosowaniach przemysłowych jako układów wykonawczych automatyki. Nowoczesne układy sterowania obrabiarkami CNC pozwalają uzyskać bardzo dużą dokładność regulacji, przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej dynamiki, dokładności pozycjonowania oraz uzyskania stabilnej pracy układu zamkniętego. Jednocześnie od wymienionych układów oczekuje się wysokiego stopnia odporności na zmienne warunki pracy podczas obróbki, wywołane przykładowo przez dynamicznie zmienne obciążenie czy zmianę parametrów obiektu sterowania, czy dobrego odrzucania zakłóceń oddziałujących na układ.

Układ sterowania zespołem posuwowym obrabiarki powinien zapewniać dobre własności dynamiczne układu zamkniętego, wysoką odporność na wspomniane wyżej zmiany parametrów, umożliwić uzyskanie zerowych ustalonych uchybów położeniowych i prędkościowych, czy cechować się brakiem wrażliwości na zakłócenia.

Z uwagi na możliwość oceny uzyskanego rozwiązania z różnej perspektywy, zbiorczo efekt działania układu regulacji można ocenić z punktu widzenia sterowania napędem przez stopień otrzymania wysokiej sztywności dynamicznej w pętli prędkościowej serwonapędu. Z drugiej strony, z punktu widzenia teorii sterowania, odpowiednikiem wyżej wymienionego jest funkcja wrażliwości powiązana z zakłóceniem oddziałującym na wybrane wejście obiektu badań, którą można odnieść do toru moment obciążenia – prędkość lub położenie.

Mnogość rozwiązań przedstawianych przez producentów obrabiarek CNC (tzw. rozwiązania inteligentne, oparte na odpowiednim przetwarzaniu sygnałów, jak aktywne odrzucanie drgań, kompensacja przemieszczeń wrzeczona w funkcji jego temperatury, czy adaptację prędkości posuwu wrzeczona w funkcji jego mocy), umożliwia jakościową analizę podejść do zagadnienia zwiększania sztywności dynamicznej, ale także na zaproponowanie sposobu rozwiązania problemu z punktu widzenia korekcji istniejącego układu regulacji z pewnymi niedoskonałościami, w szczególności bez konieczności modyfikowania zaimplementowanej przez producenta struktury układu sterowania

serwonapędem, której najczęściej zamknięta architektura uniemożliwia przeprowadzenie jakiegokolwiek ingerencji we wnętrze układu.

Stąd cennym jest opracowanie algorytmu pozwalającego na zwiększenie sztywności dynamicznej zespołu posuwowego obrabiarki możliwie bez modyfikacji struktury układu jej sterowania.

Celem opiniowanej rozprawy jest opracowanie, analityczna weryfikacja, symulacja komputerowa, implementacja na rzeczywistym układzie i finalnie – ocena jakości działania, nowego algorytmu sterowania napędem zespołu posuwowego obrabiarki opartym na liniowym modelu nominalnym. W pracy sformułowano i przedstawiono wyniki implementacji procedury projektowania bloku dynamicznej korekcji prądowej w kaskadowym układzie regulacji, umożliwiającego poprawę jakości pracy bez modyfikacji struktury układu sterowania, dostarczonego przez producenta urządzenia.

Zakres pracy wynikający z przedstawionego celu rozprawy jest bardzo szeroki i obejmuje następujące zagadnienia:

- a) modelowania łańcucha kinematycznego zespołu posuwowego obrabiarki z napędem śrubowym kulowo-tocznym,
- b) sterowania napędem w/w zespołu z zastosowaniem technik regulacji z modelem odniesienia i modelem wewnętrznym,
- c) analizy porównawczej w dziedzinie częstotliwości sztywności dynamicznej zespołu posuwowego w rozpatrywanych układach regulacji,
- d) integracji i identyfikacji wybranych parametrów stanowiska badawczego,
- e) analizy jakości pracy układu zamkniętego dedykowanego dla osi posuwu,
- f) sformułowania ogólnej procedury projektowania bloku korekcji.

Szczegółowe rozwinięcie wyżej wymienionych zagadnień stanowi zawartość rozprawy. Uwzględniając postawiony cel pracy i przedstawiony zakres rozprawy Autor sformułował następującą tezę pracy: *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.* Tezę oceniam jako poprawną i oryginalną, a określone zadanie naukowe w postaci powyższej tezy zostało postawione jasno i pozwala na weryfikację oraz ocenę efektów jego rozwiązania. Tematyka rozprawy jest aktualna i dotyczy zagadnień naukowych o istotnej wartości użytecznej, a jej podjęcie uważam za w pełni uzasadnione.

Rozprawa ma charakter symulacyjno-eksperymentalny, z silną motywacją wdrożeniową, w szczególności dotyczącą zastosowania nowoczesnych metod teorii sterowania w automatyce przemysłowej.

2. Przedmiot, zakres i ocena merytoryczna pracy

2.1. Zawartość rozprawy

Rozdział 1. rozprawy jest krótki i zawiera uzasadnienie podjęcia tematyki badań przez Autora, zgrubne przedstawienie bieżącego stanu wiedzy z rozpatrywanej tematyki, rozwiązań funkcjonujących w praktyce układów sterowania CNC, jak i krótką prezentację zagadnień rozpatrywanych w pracy.

Rozdział zawiera również sformułowanie tezy rozprawy oraz przedstawienie celu prowadzonych badań.

Rozdział 2. zawiera szczegółowe omówienie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego napędów zespołów posuwowych obrabiarek CNC, architektur układów sterowania serwonapędów, przedstawienie rozwiązań stosowanych przez producentów obrabiarek w celu poprawy jakości pracy urządzeń CNC, omówienie zagadnień sterowania wektorowego i krótką charakterystykę algorytmów sterowania w serwonapędach obrabiarek.

W **rozdziale 3.** poruszono dogłębnie zagadnienia modelowania silnika synchronicznego z magnesami trwałymi oraz kompletnego zespołu posuwowego obrabiarki sterowanej numerycznie z napędem śrubowym kulowo-tocznym. Przedstawiono między innymi poszczególne modele matematyczne części mechanicznej w/w zespołu, uwzględniając elementy translacyjne i rotacyjne, zjawisko tarcia, zagadnienie zmiany sztywności śruby kulowo-tocznej, w końcu formułując nieliniowy model zespołu posuwowego, wraz z propozycją metody jego linearyzacji.

Rozdział 4. omawia sterowanie napędem zespołu posuwowego w strukturze układu obrabiarka-uchwyt-przedmiot obrabiany-narzędzie z zastosowaniem układu sterowania z modelem odniesienia (MFC) i modelem wewnętrznym (IMC). W szczególności przedstawiono koncepcję struktury sterowania MFC/IMC, wyjaśniono powód uproszczeń opisu zastosowanych w pracy, a także przedstawiono dwa warianty pomiarowe w układzie sterowania napędem zespołu posuwowego (sprężenie zwrotne od enkodera lub od liniału pomiarowego), prezentując modele matematyczne z uwzględnieniem niepewności, z blokiem korekcyjnym lub w strukturze bez korekcji.

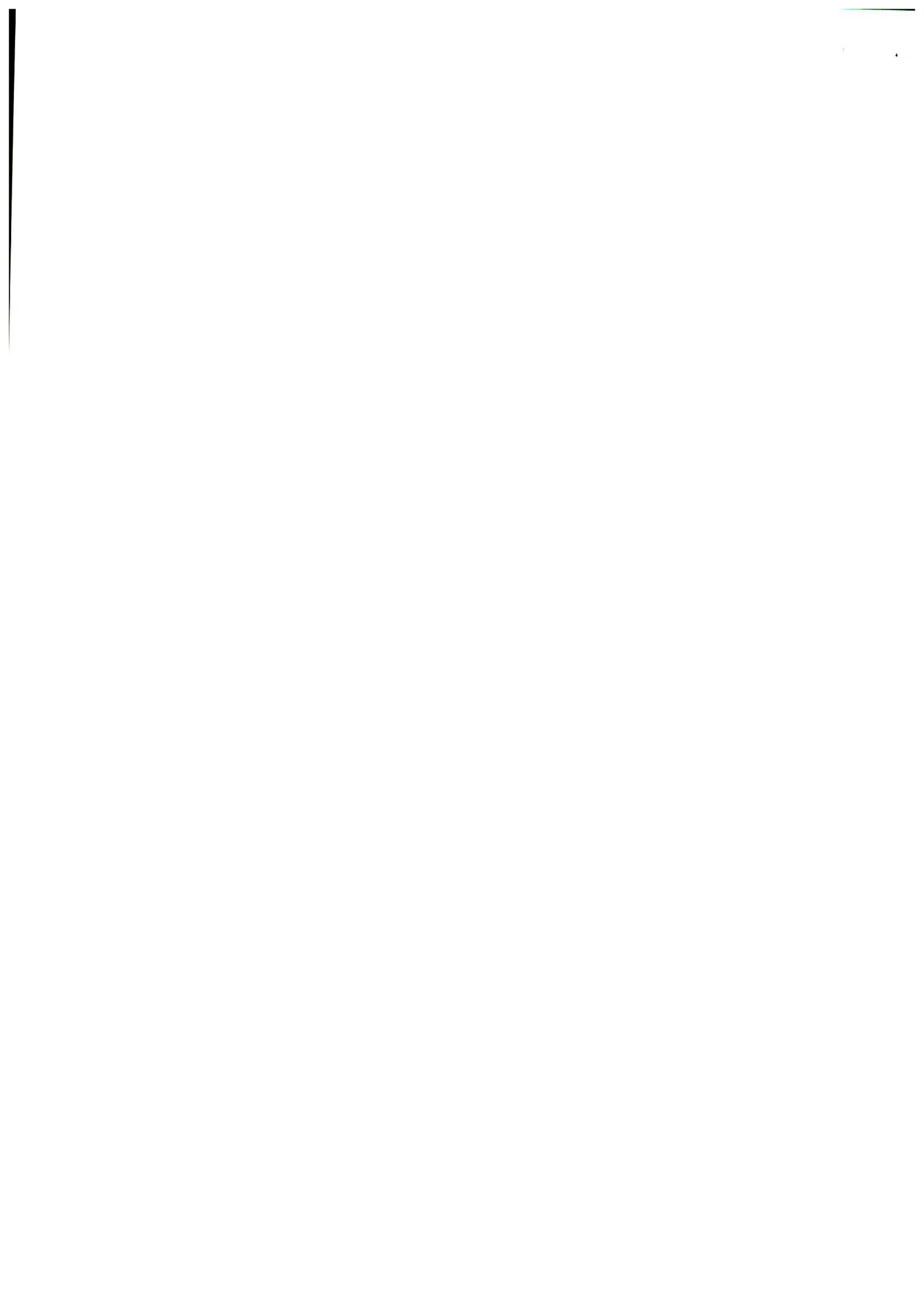
Prezentację wyników badań symulacyjnych rozpatrywanego układu Autor przedstawia w **rozdziale 5.**, omawiając komponenty, składające się na autorską bibliotekę, modelu nieliniowego zespołu posuwowego oraz wprowadzając implementacje struktur układów regulacji w środowisku Matlab. Dalej następuje przedstawienie zagadnień syntezy nastaw regulatorów pracujących w kaskadzie, analizę dopuszczalnych perturbacji parametrów modelu osi posuwu obrabiarki CNC (dla wybranych reprezentatywnych przykładów), symulacyjne porównanie sztywności dynamicznej w układzie sterowania kaskadowego bez oraz z korektorem.

Rozdział 6. przedstawia wyniki badań eksperymentalnych, wraz z omówieniem stanowiska kontrolno-pomiarowego, jakości odtwarzania wartości prędkości zadanej przez układ regulacji kaskadowej bez oraz z blokiem korekcyjnym, analizy praktycznej sztywności dynamicznej układu w odniesieniu do badań symulacyjnych, a w końcu testów rzeczywistych na stanowisku osi posuwu z omówieniem procedury identyfikacji parametrów komponentów zespołu posuwowego, wraz z podsumowaniem.

W **rozdziale 7.** Autor zaprezentował procedurę projektowania bloku korekcyjnego zawierającego nominalny model liniowy obiektu w pętli sprzężenia prędkościowego serwonapędu, w celu umożliwienia przeniesienia rezultatów przedmiotowej rozprawy na inne urządzenia mechaniczne tej samej klasy o otwartej architekturze systemu sterowania.

Rozdział 8. zawiera podsumowanie oraz propozycję dalszych kierunków badań.

Ostatnia część rozprawy (**Bibliografia**) zawiera 162 pozycje, z których większość nie jest cytowana w zasadniczej części rozprawy (umownie od rozdziału 4.). Należy nadmienić, że około 30% pozycji literaturowych (włączając cytowaną zawartość serwisów internetowych, dla których nie podano daty dostępu) jest z ostatnich 5 lat. Bibliografia stanowi reprezentatywny przegląd prac poświęconych zagadnieniom stanowiącym temat rozprawy doktorskiej.



2.2. Merytoryczna ocena pracy

Celem rozprawy jest ocena jakości działania nowego algorytmu sterowania napędem zespołu posuwowego obrabiarki opartym na liniowym modelu nominalnym. Realizacja celu wymagała wykonania szeregu działań podkreślających interdyscyplinarny charakter pracy, przez co jednak Autor pokazał, że założony cel rozprawy został w pełni osiągnięty.

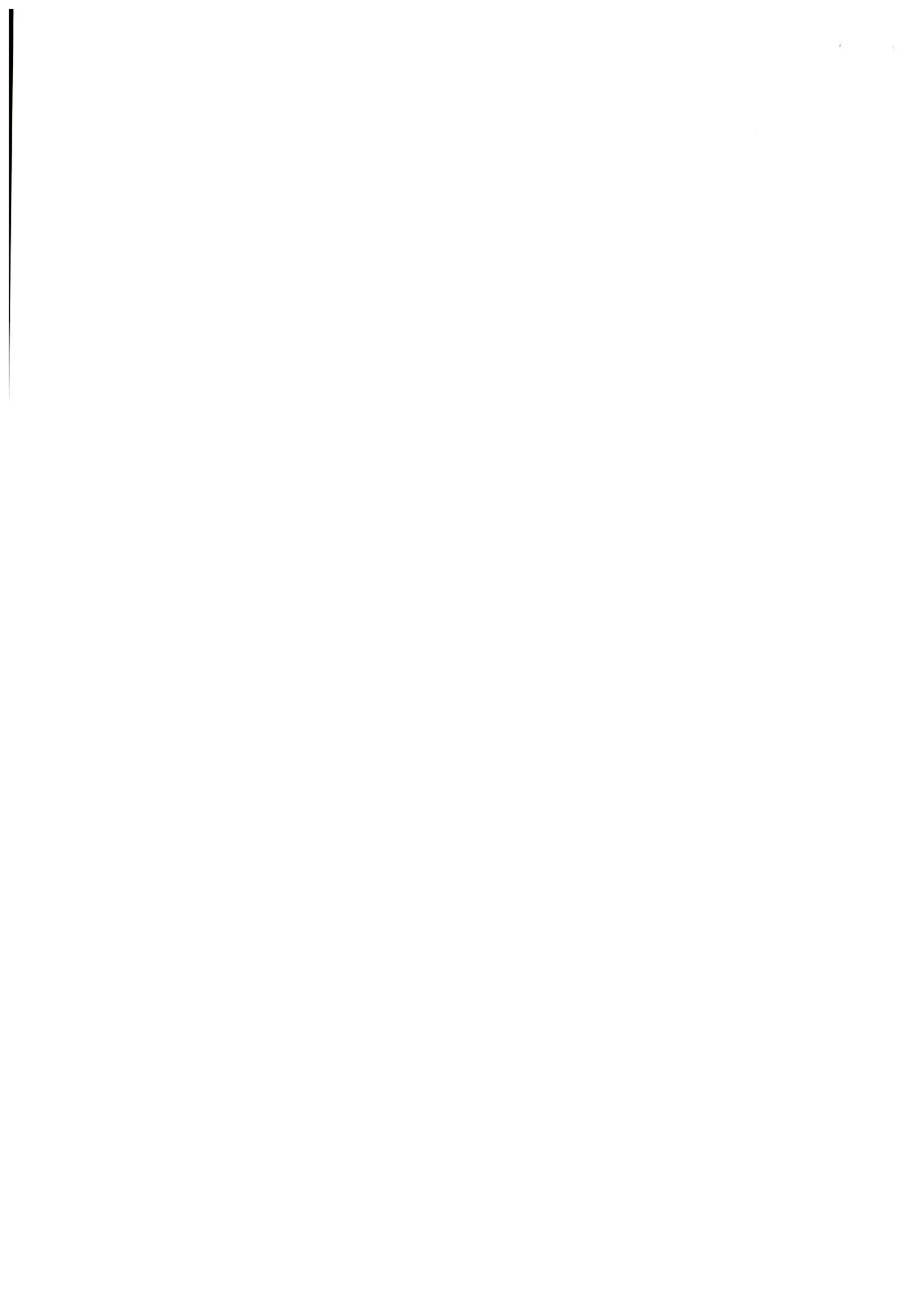
Do najważniejszych osiągnięć badawczych pracy zaliczam:

- opracowanie kompletnego, wieloparametrowego, modelu dynamiki złożonego układu sterowania zespołu posuwowego obrabiarki sterowanej numerycznie,
- opracowanie modelu zmiennej sztywności skrętnej układu śruby kulowo-tocznej w funkcji położenia kąтового nakrętki,
- analityczno-symulacyjną weryfikację tezy i zestawienie jej z wynikami eksperymentalnymi,
- zaproponowanie oryginalnej procedury projektowania korektora w strukturze sprzężenia do przodu.

Na podkreślenie zasługuje duża staranność w prezentowaniu wprowadzanych pojęć, co umożliwia łatwe śledzenie niekiedy bardzo złożonych formuł matematycznych, a niezręczności dotyczące sformułowań, utrudniające tok śledzenia w pracy są nieliczne i ich waga jest mało istotna. Można do nich zaliczyć bezkontekstowe przetłumaczenie z tekstów anglojęzycznych umownego kierunku obrotów jako pozytywny/negatywny, nadużywane słowo „relatywnie” czy pojawiające się wymiennie określenie korektora i kompensatora. Rysunki i tabele są celowo dobrane, dobrze dopracowane graficznie, choć pewne zastanowienie budzi przyczyna pozostawienia opisu anglojęzycznego na niektórych rysunkach.

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się następujące uwagi krytyczne o charakterze ogólnym:

- 1) przedstawiony i wykorzystany w rozprawie nieliniowy model zespołu posuwowego został zlinearyzowany w jednym punkcie pracy, dla zerowej prędkości obrotowej – dlaczego Autor nie pokusił się o analizę uzysku w jakości sterowania przy zastosowaniu modeli przełączanych, otrzymanych dla różnych punktów pracy wraz z określeniem prawa przełączania między modelami; czy tego rodzaju badanie zostało przeprowadzone i są dostępne jakiegokolwiek wnioski odnośnie wprowadzonego uproszczenia?
- 2) uzyskany model został zweryfikowany za pomocą badań eksperymentalnych w dziedzinie czasu, brakuje przedstawienia wyników dotyczących weryfikacji w dziedzinie częstotliwościowej;
- 3) badana struktura MFC/IMC w celu uzyskania zerowych uchybów w stanie ustalonym wymaga zastosowania akcji całkowitej zarówno w głównym torze regulacyjnym, jak i w torze sprzężenia korekcyjnego, formującym prąd addytywny – w jaki sposób zaimplementowano kompensatory zjawiska windup w tych dwóch torach oraz czy ich działanie może być ze sobą wzajemnie skorelowane w stanach dynamicznych?
- 4) w celu potwierdzenia zdolności układu zamkniętego do przenoszenia sygnału użytecznego oraz odrzucania zakłóceń, Autor posługuje się wykresami funkcji wrażliwości dla układu z oraz bez korekcji, formułując zastrzeżenie dotyczące perturbacji nad równaniem (5.2); brakuje jednak analizy odporności stabilności w obecności ograniczonych błędów modelowania (perturbacji), z wykorzystaniem twierdzenia o niewielkim wzmocnieniu (*small-gain theorem*) – jakie są możliwości przeprowadzenia takiej analizy w oparciu o rozważane modele dynamiki?



Podział tekstu rozprawy na rozdziały jest prawidłowy, materiał ilustracyjny jest bogaty i czytelny, a przedstawiona bibliografia jest reprezentatywna dla problematyki poruszanej przez Autora.

Praca nie ma zasadniczych wad, można jednak wykazać drobne uchybienia lub elementy dyskusyjne:

- stosowanie terminu zapas marginesu stabilności zamiast wprost zapas stabilności,
- s. 24₄: uchyb wartości sterującej powinien być zamieniony na uchyb wartości sterowanej,
- s. 61: oznaczenia wektorów wytłuszczone, zamiast jak np. na s. 20 – z podkreśleniem,
- s. 84₁₀: kolokwializm – *zwinięte* regulatory prądu,
- s. 91¹⁵: regulatory inne niż ten w strukturze PID również można zapisać za pomocą równań stanu,
- s. 109: w pracy właściwie nie sformułowano kryterium doboru nastaw regulatora, przez co dokładność z jaką Tabela 5.1 przedstawia wartości wzmocnień budzi zdziwienie.

3. Ocena końcowa i wniosek

Mimo przedstawionych powyżej uwag krytycznych, które nie dotyczą zasadniczego dorobku Doktoranta, uważam, że postawiony cel pracy ma charakter naukowy i został konsekwentnie zrealizowany. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej, opanował ogólną wiedzę teoretyczną w zakresie prezentowanym w rozprawie oraz wykazał wysoki poziom umiejętności praktycznych przy integracji i obsłudze stanowiska badawczego.

Wobec powyższych uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Waszczuka *Zwiększenie dynamicznej sztywności zespołu posuwowego obrabiarki poprzez wykorzystanie struktury sterowania zawierającej nominalny liniowy model* spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim oraz mieści się w dyscyplinie Automatyka i Robotyka. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



/Dariusz Horla/

