



PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
Technologie Kosmiczne
prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Wichra pt.

Sterowanie nieliniowych układów mechanicznych z wykorzystaniem metody aktywnej kompensacji zakłóceń (ADRC)

Opracowana na podstawie zlecenia Przewodniczącego
Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej

1. CHARAKTERYSTYKA DZIEDZINY I OCENA TEMATU ROZPRAWY

Od nowoczesnych układów napędowych oczekuje się coraz lepszych właściwości dynamicznych i statycznych. Dąży się do skracania czasów regulacji prędkości/pozycji elementów wykonawczych przy jednoczesnej eliminacji oscylacji zmiennych stanu. Bardzo dobrej jakości regulacji oczekuje się od systemów zarówno o znamionowych jak i zmienionych parametrach. Powyższe wymagania związane są z ciągłym naciskiem zarówno na zwiększenie produktywności jak i jakości wykonywanych produktów. Klasyczna struktura sterowania napędu elektrycznego zakłada sztywność połączenia pomiędzy silnikiem a maszyną roboczą. Jednakże w wielu przypadkach takie podejście jest niedopuszczalne. Podstawowym czynnikiem zakłócającym jest sprężystość połączenia mechanicznego. Dodatkowymi elementami obniżającymi właściwości dynamiczne układu są luz mechaniczny oraz nieliniowe tarcie pojawiające się zarówno po stronie silnika napędowego jak i maszyny roboczej.

Podstawowy układ sterowania prędkością/pozycja napędu elektrycznego opiera się na strukturze kaskadowej z regulatorami PI. Jednakże układ ten nie jest skuteczny w efektywnym tłumieniu drgań skrętnych. W celu poprawy jego właściwości stosuje się różne podejścia. Jedno z najprostszych polega na wprowadzeniu do układu dodatkowych sprzężeń zwrotnych od wybranych zmiennych stanu. Innym podejściem jest zastosowanie regulatora stanu czy sterowania z dynamicznym wymuszeniem momentu napędowego. W przypadku

układu o zmiennych parametrach stosuje się sterowanie odporne (np. ślizgowe) czy też adaptacyjne. W ostatnich latach coraz większą popularnością cieszy się sterowanie predykcyjne.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono zagadnienia związane z zaawansowanymi metodami sterowania układu napędowego z połączeniem sprężystym. Rozważano układ o znamionowych jak i zmiennych parametrach, dodatkowo z luzem mechanicznym. Przebadano szereg układów efektywnie tłumiących drgania skrętne. Opiniowana rozprawa doktorska nawiązuje do najbardziej istotnych, nowoczesnych i cieszących się dużym zainteresowaniem zagadnień z dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne badanych przez szereg ośrodków naukowych i przemysłowych.

2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów podstawowych, streszczenia, spisu treści i literatury. Całość pracy zawarta jest na 158 stronach. Autor odnosi się do 63 pozycji literatury. Oprócz pozycji klasycznych wymagających cytowania, większość zamieszczonych źródeł powstała w ciągu ostatnich lat.

Podstawowym celem pracy jest zaprojektowanie i wszechstronne przebadanie układu regulacji opartego na sterowaniu z wykorzystaniem aktywnej kompensacji zakłóceń powtarzalnym dla układu napędowego z połączeniem sprężystym zarówno bez jak i z luzem mechanicznym.

Bazując na przedstawionym celu pracy w rozprawie zaproponowano następującą tezę naukową:

Możliwe jest wykorzystanie metody aktywnej kompensacji zakłóceń dla sterowania prędkością złożonego układu mechatronicznego, zawierające w swojej strukturze połączenia o ograniczonej sztywności, luz mechaniczny oraz tarcie, pozwalającej na uzyskanie zadanych właściwości dynamicznych zamkniętego układu regulacji.

Dowodząc tezy naukowej rozprawy przyjęto czytelny sposób postępowania. Po krótkim wprowadzeniu do tematyki przedstawiono przegląd literatury z zakresu badań. Następnie przedstawiono tezę, cel i zakres pracy. W rozdziale drugim zamieszczono modele matematyczne badanych układów napędowych. Na wstępie rozdziału podano założenia upraszczające. Kolejno przedstawiono modele: 'idealizowanego' układu dwumasowego, luzu mechanicznego, tarcia w silniku napędowym i w maszynie roboczej oraz elementu wykonawczego (układu generacji momentu napędowego). Rozdział zakończono całościowym

modelem nieliniowego układu napędowego uwzględniającego wcześniej opisane elementy mechaniczne.

W rozdziale trzecim przedstawiono rozważane struktury regulacji. Jest to najbardziej wartościowa część ocenianej pracy. Jako pierwszy układ założono strukturę ze sprzężeniem od prędkości silnika napędowego. Opis układu podzielono na dwie części. W pierwszej z nich zaprezentowano opis układu pracującego w strefie luzu. Omówiono kolejno podstawową strukturę sterowania, model obserwatora w przestrzeni stanu, blok odsprężania układu, układ kształtowania sygnału zadanego oraz regulator. Kolejno przeanalizowano właściwości statyczne i dynamiczne rozważanego układu regulacji. Omówiono również wpływ dynamiki pętli generacji momentu elektromagnetycznego na przebiegi zmiennych stanu. W drugiej części rozważano pracę układu sterowania (ze sprzężeniem od prędkości od silnika napędowego) znajdującego się poza strefą luzu. Badano wpływ momentu skrętnego, obciążenia oraz tarcia na pętlę regulacji prędkości. Kolejno przeanalizowano właściwości statyczne i dynamiczne układu. Przedstawiono metodykę doboru parametrów układu. Badano również wpływ zmian wybranych parametrów na lokalizację biegunów układu zamkniętego. W kolejnej części rozdziału rozważano układ regulacji bazujący na sprzężeniu zwrotnym od prędkości silnika napędowego i maszyny roboczej. W tej części zaproponowano wykorzystanie do sterowania regulator stanu. Kolejno przedstawiono obserwator o rozszerzonym wektorze stanu, blok odsprężania sygnału zakłócenia oraz regulator stanu. Kolejno przeanalizowano właściwości statyczne i dynamiczne rozważanego układu sterowania oraz zaprezentowano metodykę doboru parametrów. Następnie przebadano odporność układu regulacji na zmianę wybranych parametrów obiektu.

W rozdziale czwartym zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych analizowanych w pracy struktur sterownia. Na wstępie przedstawiono przyjęte założenia projektowe. Należy podkreślić starania odzwierciedlenia w tych badaniach struktury stanowiska rzeczywistego (włączając w to rozdzielczość czujników, częstotliwości próbkowania, układu regulacji momentu itp.). Zaprezentowano wyniki ukazujące właściwości estymatora ESO, estymatora GESO i zamkniętych układów regulacji. Badano układy bez i z luzem mechanicznym. Kolejno sprawdzono odporność układów regulacji na zmianę momentu bezwładności obciążenia. Rozdział zakończono krótkim podsumowaniem.

Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono w rozdziale piątym. Na wstępie opisano stanowisko laboratoryjne z silnikami PMSM. Przedstawiono szereg zdjęć ilustrujących konstrukcję stanowiska badawczego. Jako pierwsze zaprezentowano testy ukazujące identyfikację stałej czasowej układu regulacji momentu oraz wpływ strefy luzu na charakterystyki częstotliwościowe układu. Następnie przetestowano zaprojektowane w pracy estymatory. Jako pierwsze zaprezentowano wyniki związane z estymatorem GESO

odtworząc zarówno prędkość silnika napędowego jak i prędkość obciążenia. Testy wykonano dla układu o znamionowych parametrach, z luzem mechanicznym jak również o zwiększonej wartości bezwładności maszyny roboczej. Kolejno zaprezentowano wyniki badań obrazujące odtwarzanie momentów zakłócających przez obserwatory GESO i ESO. Badano układy regulacji bez oraz z luzem mechanicznym. W następnym punktach pracy zamieszczono wyniki badań zamkniętych struktur regulacji z różnymi typami regulatorów i przy różnych wymuszeniach (skokowa zmiana prędkości i obciążenia). Podobnie jak poprzednio, badano układ bez i z luzem mechanicznym. Pracę zakończono podsumowaniem, w którym przedstawiono najważniejsze wnioski dotyczące pracy.

3. OCENA PRACY

W opiniowanej pracy przedstawione zostały zagadnienia związane z tłumieniem drgań skrętnych za pomocą zaawansowanych struktur sterowania. Tematyka i prezentowane wyniki są oryginalne zarówno w skali krajowej jak również światowej. Dodatkowym czynnikiem wyróżniającym pracę jest fakt, że Autor nie ograniczył się tylko do jednego rozwiązania, ale zaprezentował krytyczną analizę porównawczą różnych podejść. Kolejną zaletą pracy jest podejście wybrane przez Autora i przedstawienie w rozprawie pełnego cyklu badawczego. Analiza teoretyczna jest poparta licznymi wynikami badań symulacyjnych oraz eksperymentem laboratoryjnym, dzięki czemu założony cel pracy został osiągnięty, a teza rozprawy w pełni udowodniona.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć rozprawy należy zaliczyć:

- Opracowanie struktury regulacji napędu elektrycznego z połączeniem sprzężystym w przypadku założenia dostępności pomiaru po stronie silnika napędowego, w tym zaproponowanie metody doboru parametrów estymatora zakłóceń ESO oraz regulatora prędkości. Przeprowadzenie analizy teoretycznej opracowanej struktury sterowania.
- Zaprojektowanie struktury regulacji napędu elektrycznego z połączeniem sprzężystym w przypadku założenia dostępności pomiaru po zarówno po stronie silnika napędowego jak i maszyny roboczej, w tym zaproponowanie metody doboru parametrów estymatora zmiennych stanu GESO oraz regulatora prędkości. Przeprowadzenie analizy teoretycznej opracowanej struktury sterowania.
- Przeprowadzenie wieloaspektowych badań opracowanych układów regulacji (zarówno regulatorów jak i estymatorów), również w przypadku zmian parametrów obiektu (momentu bezwładności maszyny roboczej i szerokości strefy luzu)

- Uruchomienie stanowiska badawczego składającego się z dwóch silników PMSM połączonych sprężystym wałem i sprzęgłem umożliwiającym uzyskanie różnej szerokości strefy luzu jak również zwiększenia momentu bezwładności maszyny roboczej.
- Opracowanie programu sterowania dla stanowiska rzeczywistego.
- Wykonanie serii badań symulacyjnych i testów eksperymentalnych.

Redakcja pracy jest poprawna, tym niemniej autor nie uniknął drobnych błędów edytorskich i stylistycznych, np.:

- Niekonsekwentny sposób formatowania pracy. Przykładowo tytuł rozdziału pierwszego jest w całości napisany wielkimi literami, a w tytule drugiego występuje tylko pierwsza wielka litera.
- Brak wcięcia w podrozdziale 1.2.1 i w dalszych.
- W podrozdziale 1.2.2 opisane są różne podejścia do sterownia układu z połączeniem sprężystym. Pierwsze z nich opisane jest na 22 wierszach, drugie 13, a pozostałe (3,4 i 5) od 1 do trzech. Świadczy to o pewnym zmęczeniu Autora bądź o niedostatecznej analizie literatury.
- W rozprawie oznaczono literą T zarówno momenty (napędowy, skrętny, obciążenia i inne), współczynnik tarcia jak i stałe czasowe. Czasami utrudnia to odbiór rozprawy.
- W Tabeli 1.3 moment tarcia po stronie obciążenia jest niewłaściwie oznaczony.
- Nazwa modelu nazywanego w rozprawie 'idealizowanym' w literaturze jest wymieniona jako model układu z bezinercyjnym połączeniem sprężystym.
- Niewłaściwe oznaczenie we wzorze 2.10.
- Oznaczenie na rys. 2.3 nie odpowiada oznaczeniu we wzorze 2.14 (T_{F20} i T_{F2}).
- Strona 30 Podana wartość $\xi=0$ a powinno być $\xi=1$.
- Strona 33 $s \rightarrow \infty$ zamiast $s \rightarrow 0$.
- W rozprawie prędkości oznaczone są zarówno jako ω i Ω (np. str. 29 w. 11; str. 31, w. 14)

Po lekturze pracy nasuwa się kilka uwag o charakterze dyskusyjnym o różnej wadze merytorycznej, na które proszę o odpowiedź:

- W rozdziale 3.1 przeanalizowano układ pracujący w strefie luzu, czyli w przypadku braku połączenia silnika napędowego z maszyną roboczą. Jak interpretować zatem analizę wpływu momentu obciążenia na badany układ? (strona 33).

- W pracy znajduje się szereg zależności matematycznych. Przykładowo w podpunkcie 3.1.7.1 analizowany jest jeden z przypadków. Proszę o wskazanie czy transmitancje 3.32 i 3.33 są wyznaczone poprawnie?
- W przyjętym do analizy modelu matematycznym obiektu występują momenty tarcia zlokalizowane zarówno po stronie silnika napędowego jak i maszyny roboczej. Proszę o wskazanie wpływu moment tarcia silnika na dokładność estymacji zmiennych stanu układu (dla ESO)?
- Przyjęty do rozważań regulator jest typu P. Uwzględniając użyty w strukturze blok eliminacji zakłóceń słusznym jest stwierdzenie braku uchybu ustalonego. Ale czy takie podejście ma swoje wady w zastosowaniach praktycznych? (zastosowanie regulatora typu P zamiast PI w analizowanym układzie).
- W rozdziale trzecim Autor omawia strukturę badanego układu regulacji. Wyróżnia w niej między innymi bloki controller i rejector (rys. 3.10). W obu blokach występują niezależne ograniczenia. W jaki sposób Autor ustawił wartości ograniczeń? Czy są one wzajemnie skorelowane? Czy poziomy przyjętych ograniczeń mogą wpłynąć na właściwości układu a w szczególnym przypadku zdestabilizować jego pracę?
- Kolejne pytanie dotyczy struktury z rys. 3.10. Sygnałem wejściowym układu jest referencyjny moment napędowy. Pierwsze z zakłóceń T_{D1} zlokalizowane jest po stronie silnika, tak więc teoretycznie możliwa jest jego kompensacja. Drugie zakłócenie T_{D2} związane jest z maszyną roboczą. Czy kompensacja tego zakłócenia, w sposób zaproponowany w rozprawie, będzie efektywna we wszystkich przypadkach? Czy w przypadku szybkozmiennego zakłócenia może przynieść efekt odwrotny od zamierzonego? W jaki sposób można idealnie (teoretycznie) wyeliminować zakłócenie pojawiające się po stronie maszyny roboczej?
- Czy umieszczenie współczynnika k_i w sposób przedstawiony na rys. 3.11 i 3.12 jest poprawne w ogólnym przypadku?
- W pierwszym z rozważanych przypadków Autor założył zastosowanie regulatora typu P dowodząc zdolności eliminacji uchybu ustalonego przez badany układ regulacji. W przypadku regulatora stanu zdecydował się wprowadzić do struktury integrator. Czy możliwe jest zastosowanie regulatora stanu bez wspomnianego integratora i jednocześnie zapewnienie astatyzmu pętli regulacji?
- Na rys. 4.3 przedstawiono strukturę badanego regulatora prędkości. Autor przyjmuje nazwę PI-2DOF. Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób można kształtować charakterystyki regulatora w dwóch wymiarach jednocześnie? (wynikające z nazwy 2DOF).

- Na rys. 4.9 i innych można zaobserwować zjawisko wysokoczęstotliwościowych oscylacji momentu zakłócającego. Czy takie zjawisko jest uzasadnienie fizyczne? Czy można je w jakiś sposób wyeliminować?
- Na stronie 89 przedstawiono badania obrazujące wpływ strefy luzu na dokładność estymat momentów zakłócających. Na rys. 4.12 przedstawiono przebiegi wybranych zmiennych i wielkości. Zwraca uwagę fakt, że od chwili zerowej w estymatach występuje duży błąd ustalony. Proszę o komentarz.
- Na str. 96 Autor stwierdza: 'Regulator PI-2DOF z uwagi na swoją strukturę zawierającą blok całkowania na wyjściu, osiąga sygnał ograniczenia po relatywnie długim czasie'. Proszę o komentarz.
- Czy możliwe jest zastosowanie innego podejścia do projektowania regulatora stanu w sposób zwiększający jego odporność na zmiany parametrów?

4. PODSUMOWANIE

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy. Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Bartłomieja Wichra pt. *Sterowanie nieliniowych układów mechanicznych z wykorzystaniem metody aktywnej kompensacji zakłóceń (ADRC)* zawiera rozwiązanie problemu naukowego, dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy badawczej, potwierdza bardzo dobre przygotowanie z dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne a zwłaszcza z teorii sterowania, napędu elektrycznego, modelowania i programowania. Dowodem tych umiejętności są nie tylko rozważania teoretyczne i badania symulacyjne, ale również ich praktyczne wykorzystanie, udowodnione poprzez badania eksperymentalne wykonane na stanowisku laboratoryjnym.

Należy podkreślić, że materiał zawarty w rozprawie był prezentowany na konferencjach krajowych i zagranicznych. Dodatkowo Autor rozprawy publikował w uznanych czasopiśmie, co podkreśla aktualność tematyki i wskazuje na wysoki poziom merytoryczny zagadnień poruszanych w rozprawie.

Reasumując, w mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę o tytule i stopniach naukowych i w związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Marek Szubert