Prof. dr hab. inż. Krzysztof Szabat
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska
ul Smoluchowskiego 19
50-372 Wrocław

Wrocław 2016-12-20

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 29 -12- 2016
DZIEKAN
Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej
dr hab. inż. Zbigniew Nadolny, prof. PP

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Gniadka pt.

Kształtowanie sygnału zadanego

w sterowaniu elektromechanicznych układów drgających

Opracowana na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej

1. CHARAKTERYSTYKA DZIEDZINY I OCENA TEMATU ROZPRAWY

Problematyka tłumienia drgań w układach elektromechanicznych jest zagadnieniem niezwykle aktualnym, rozpatrywanym zarówno teoretycznie jak i praktycznie w dużej ilości ośrodków naukowych i przemysłowych. Drgania mechaniczne występują w całym szeregu różnych obiektów zaczynając od konstrukcji budowlanych (budynki, mosty), poprzez złożone konstrukcje mechaniczne (np. radioteleskopy, suwnice, maszyny wyciągowe), w typowych układach napędowych (np. serwomechanizmy, napędy robotów), w napędach miniaturowych (np. napędy dysków twardych) po układy MEMS (micro electromechanical system). Drgania w sposób negatywny wpływają na szereg właściwości układu napędowego poczynając od zmniejszenia jego niezawodności, skrócenia czasu jego użytkowania, ograniczenia zakresu stosowania napędu, obniżenia precyzji działania napędu po negatywne oddziaływanie na otoczenie. Wyeliminowanie czy ograniczenie występowania drgań w bezpośredni sposób przyczynia się po poprawy charakterystyk układu w wyżej wymienionych obszarach.

W literaturze istnieje szereg metod tłumienia drgań różniących się od siebie w znaczący sposób. Za najbardziej obiecujące, z ekonomicznego i też praktycznego punktu widzenia, uważa się tzw. aktywne metody tłumienia drgań. Nie zakładają one modyfikacji istniejącego obiektu (np. przez dodanie tłumików mechanicznych) a bazują na odpowiednim kształtowaniu sygnału sterującego doprowadzonego do układu. Jako przykład można tutaj wymienić zastosowanie cały szereg regulatorów różnych typów (np. stanu, adaptacyjnych, predykcyjnych).

K Szabat

W opiniowanej rozprawie doktorskiej wykorzystano aktywne metody tłumienia drgań bazujące na odpowiednim kształtowaniu sygnału zadanego w wybranej strukturze regulacji. Jako obiekt wybrano linię technologiczną transportującą podczepione ładunki. W mojej ocenie przedstawione w pracy zagadnienia nawiązuje do najbardziej istotnych i cieszących się dużym zainteresowaniem zagadnień z dyscypliny Automatyka i Robotyka badanych przez szereg ośrodków naukowych i przemysłowych.

2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska składa się z dziewięciu rozdziałów podstawowych, spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń, spisu literatury oraz załącznika – płyty CD z materiałami. Całość pracy zawarta jest na 196 stronach. Należy podkreślić aktualność literatury – większość pozycji pochodzi z ostatnich 10 lat.

Podstawowym celem pracy jest zaprojektowania i wszechstronne przebadane układu sterowania suwnicy. Istotną częścią rozprawy jest analiza porównawcza efektywności tłumienia drgań mechanicznych w różnych struktur sterowania.

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

„Zastosowanie algorytmów samostrojenia i adaptacji w bloku kształtowania sygnału zadanego pozwala na poprawę jakości regulacji elektromechanicznych układów drgających. Możliwa jest implemantacja takich algorytmów charakteryzująca się zdolnością do realizacji zadań w czasie rzeczywistym ”

którą rozbito na trzy tezy cząstkowe.

Dowodząc tezy naukowej rozprawy przyjęto czytelny sposób postępowania. Po krótkim wprowadzeniu do tematyki przedstawiono przegląd literatury na temat metod tłumienia drgań. Dokładnie przeanalizowano podejścia oparte na kształtowaniu sygnału zadanego. Następnie przedstawiono tezę, cel i zakres pracy oraz opisano metodologię badań przyjętą w rozprawie. Sprecyzowano elementy nowatorskie zawarte w rozprawie oraz zdefiniowano wybrane pojęcia używane w dalszej części pracy. Modele matematyczne układów wielo-masowych zaprezentowano w rozdziale drugim. Szczegółowo opisano modele dwu- i trzy-masowy. Zaprezentowano charakterystyki dodatkowych elementów nieliniowych występujących w układzie mechanicznym – tarcia i luzu oraz współczynnika sprężystości. Opisano również model pętli generacji momentu elektromagnetycznego. Sposób modelowania suwnicy przedstawiono w rozdziale czwartym. Rozważania zaczęto od scharakteryzowania tego typu układów. Kolejno zaprezentowano model wahadła który następnie odniesiono do układu suwnicy. Rozdział zakończono przedstawiając schemat

struktury sterowania położeniem suwnicy. Następnie zaprezentowano kryteria oceny jakości regulacji wykorzystywane w dalszej części pracy.

Po tej części pracy zaczyna się najbardziej oryginalna część opiniowanej rozprawy doktorskiej. W rozdziale piątym zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych dotyczących w zamkniętej struktury sterowania prędkością układu dwumasowego z różnymi typami regulatorów: PI, LQI, H^{∞} . Przeprowadzono analizę porównawczą badanych struktur. Następnie przedstawiono wyniki sterowania pozycją suwnicy przy wykorzystaniu regulatorów PI. Wskazano na ograniczenia badanej struktury sterowania. W rozdziale szóstym autor przedstawił ideę układów kształtowania sygnału zadanego. Posłużył się do tego wybraną transmitancją obrazującą układ regulacji. Zaprezentowane wyniki potwierdziły skuteczność analizowanej metody. W dalszej części rozważono użycie filtrów pasmowych i funkcji wielomianowych. Zaprezentowane wyniki badań symulacyjnych potwierdziły możliwości tłumienia drgań. Rozdział zakończono analizą prezentowanych metod. Jako najbardziej efektywną można uznać metodę kształtowanie sygnału za pomocą wielomianowych funkcji sklejanych. W rozdziale 7 zaprezentowano zastosowanie metody IS dla obiektów niestacjonarnych. Omówiono dwa podstawowe przyczyny zmiany parametrów w suwnicy: zmianę długości liny oraz masy podwieszonego ciężaru. Wprowadzono unormowanie wartości wskaźników jakości regulacji co znacząco ułatwia ocenę otrzymanych wyników. Kolejno przedstawiono wyniki badań odnoszących się do układu o zmiennej długości liny i stałym kształcie sygnału zadanego (obliczonego dla znamionowych parametrów), układów odpornych, układów super-odpornych, układów samostrojących, układów przestrajanych na podstawie znanego sygnału pomiarowego, układów adaptacyjnego przestrajania parametrów IS oraz układów z doborem parametrów za pomocą algorytmu rojowego. W podsumowaniu rozdziału omówiono wady i zalety rozważanych podejść. W rozdziale ósmym przedstawiono wyniki weryfikacji eksperymentalnej analizowanych w pracy rozważań. Jako obiekt wybrano transporter podwieszany wykorzystywany w zakładzie produkcyjnym w firmie Amica S.A. Szczegółowo opisano jego budowę. Opisano zaprojektowany przez autora wizyjny system pomiarów wielkości transportera. Następnie opisano implementację wybranych algorytmów sterowania w układzie rzeczywistym. Kolejno przedstawiono i omówiono uzyskane wyniki. Pracę zakończono podsumowaniem w którym przedstawiono najważniejsze wnioski dotyczące pracy. Sprecyzowano również dalsze planowane prace.

3. OCENA PRACY

W opiniowanej pracy przedstawione zastały zagadnienia związane z kształtowaniem sygnału zadanego w układach z drganiami mechanicznymi. Tematyka i prezentowane wyniki są oryginalne w skali krajowej jak również częściowo i światowej. Dodatkowym czynnikiem wyróżniającym pracę jest fakt, że autor nie ograniczył się tylko do jednego rozwiązania ale zaprezentował krytyczną analizę porównawczą różnych podejść (rozdział siódmy). Algorytm sterowania zawarty w pracy został zaimplementowany w rzeczywistym procesie technologicznym w firmie Amica S.A. co stanowi jedno z najważniejszych osiągnięć rozprawy. Kolejną zaletą rozprawy 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:

- Krytyczna analiza literatury z zakresu metod kształtowania sygnału w układach wielomasowych.
- Opracowanie oraz przebadanie różnych algorytmów kształtowania sygnałów w przypadku obiektu o zmiennych parametrach. Na uwagę zasługują zwłaszcza algorytmy adaptacyjne.
- Zastosowanie algorytmów rojowych do doboru parametrów układu kształtowania sygnału w obiekcie niestacjonarnym.
- Implementacja wybranych algorytmów kształtowania sygnału do sterowania rzeczywistym obiektem przemysłowym. Osiągnięcie to wymagało opracowania dodatkowych wizyjnych układów pomiarowych i pokonaniu innych ograniczeń praktycznych.

Drgania mechaniczne mogą być tłumione przy użycie różnych algorytmów sterowania takich jak regulatory odporne, predykcyjne czy adaptacyjne. Wszystkie te metody wymagają jednak możliwości modyfikacji kształtowania sygnału sterującego momentem elektromagnetycznych (w układach z silnikami elektrycznymi). Istnieją jednak przypadku w których użytkownik nie ma takich możliwości (ze względów braku dostępnej mocy obliczeniowej, braku praw autorskich dotyczących modyfikacji algorytmów itp.). W tym przypadku algorytmy omawiane i opracowane przez autora rozprawy mogą stanowić jedyną możliwość aktywnego tłumienia drgań. Chciałbym to podkreślić w mojej recenzji.

W Szabat

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

- Na stronach 84 i 85 autor odnosi się do numerów rysunków 6.16 i 6.17 podczas gdy w rzeczywistości posiadają one oznaczenia 6.15 i 6.16.
- Na rysunku 6.5 brakuje oznaczenia osi y w ostatnim składowym wykresie.
- Str. 95 wiersz 7 jest „przyrostowa", powinno być przyrostową.
- Str. Autor piszę „Transporter napędzany jest przez układ dwóch napędów przez silniki oraz przekształtniki firmy Siemens serii Sinamics G120" Moim zdaniem zgrabniejsza byłaby inna forma np. Podwójny przekształtnikowy układ napędowy typu Sinamics G120 firmy Siemens jest elementem składowym transportera.

Należy podkreślić, że wymienione błędy nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę pracy.

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

1. W rozdziale piątym autor przedstawia wyniki badań dotyczących sterowania układu dwumasowego za pomocą różnego typu regulatorów. Niestety brakuje kryterium doboru parametrów poszczególnych regulatorów. Jak autor pisze w rozprawie parametry regulator PI dobrano w: „sposób umożliwiający szybkie sterowanie bez przeregulowań". Tymczasem na rys. 5.2 układ posiada w przybliżeniu 40% przeregulowanie. Analizując kolejne układy nie sposób uniknąć pytania dlaczego regulator LQI (posiadający sprzężenia od wszystkich zmiennych stanu) nie jest w stanie wytłumić oscylacji? Uważam również, że zamieszczenie przebiegów momentów elektromagnetycznego i skrętnego zwiększyłoby czytelność pracy. Przykładowo wyjaśniłoby różną częstotliwość oscylacji prędkości w czasie rozruchu dla układu z regulatorem PI i LQI. Prosiłbym również komentarz dotyczący wartości zadanej prędkości – jest ona dość mała 1 rad/s. Czy inne wartości prędkości były rozważane w badaniach?
2. Na stronach 78-79 autor opisuje procedurę identyfikacji parametrów układu sterowania i jako wynik podaje transmitancję pętli otwartej 6 stopnia. Proszę o sprecyzowanie co zostało uwzględnione w pętli regulacji. Regulator PI i układ dwumasowy to zależność 4 stopnia. Czy dwa pozostałe bieguny związane są z układem wymuszenia momentu?
3. Ograniczenia sygnałów sterujących w układach automatyki jest jednym z podstawowych wymagań. Tymczasem autor nie odnosi się do tego wprost i nie podaje wersji algorytmu anti-windup używanego w badaniach. Prosiłbym o jego podanie.

4. Autor w rozprawie opisuje pętlę kształtowania momentu elektromagnetycznego. Prosiłbym o sprecyzowanie w jaki sposób jej dynamika wpływa na opracowane algorytmy.
5. W pracy autor skupił się na układach dwumasowych. Istnieje jednakże szereg aplikacji w których układ należy modelować jako system trój-masowy. Nasuwa się więc pytanie czy opracowane algorytmy można w łatwy sposób przenieść na układy o większej ilości mas?

4. PODSUMOWANIE

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy. Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Gniadka pt. *Kształtowanie sygnału zadanego w sterowaniu elektromechanicznych układów drgających* zawiera rozwiązanie problemu naukowego, dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy badawczej, potwierdza bardzo dobre przygotowanie z dziedziny elektrotechniki, teorii sterowania, napędu elektrycznego oraz informatyki. Dowodem tych umiejętności są nie tylko rozważania teoretyczne i badania symulacyjne ale również ich praktyczne wykorzystanie, udowodnione przez implementację rozważanej strategii sterowania w rzeczywistym procesie technologicznym w firmie Amica S.A.

Reasumując, 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.

Magdalena Swałt