

Prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak
Politechnika Warszawska,
Wydział Elektryczny

Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Karola Tatara** pt. „*Synteza regulatorów ślizgowych dla przetworników energoelektronicznych ze słabo tłumionymi wejściowymi filtrami LC*”

opracowana na podstawie uchwały Rady Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej z dnia 2-07-2019 r.

1. Ocena wyboru tematyki rozprawy

Sterowanie ślizgowe jest opisywane od przeszło 60-tu lat, przy czym w początkowym okresie były to prace teoretyczne. Właściwości regulatorów ślizgowych takie jak niewrażliwość na zakłócenia zewnętrzne i tolerowanie niedokładności w opisie obiektu regulacji powodują, że ten sposób sterowania jest wykorzystywany w sterowaniu między innymi przekształtników energoelektronicznych. Sterowanie ślizgowe jest szczególnie interesujące w przypadku obiektów nieliniowych. Istnieje wiele publikacji opisujących regulatory ślizgowe w dziedzinie czasu ciągłego jak i czasu dyskretnego. Świadczy to o aktualności zagadnień, będących przedmiotem opiniowanej pracy. Tematykę rozprawy należy uznać za interesującą i trafnie wybraną zarówno pod względem rozwiązania problemów teoretycznych jak i ewentualnych zastosowań w układach sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi.

2. Charakterystyka pracy i uwagi dyskusyjne

Opiniowana praca doktorska liczy 121 stron łącznie ze spisem literatury zawierającym 95 pozycji. Uzupełnienie stanowi załącznik zawierający schematy stanowiska laboratoryjnego wykorzystywanego w pracy. Podzielona została na 7 rozdziałów a autorskie przedstawienie zagadnień syntezy regulatora ślizgowego dla przekształtnika DC/DC o topologii obniżającej napięcie zostały przedstawione w rozdziałach 3 i 4.

Rozdział pierwszy zawiera opisy zasad sterowania ślizgowego układów o zmiennej strukturze zarówno w dziedzinie czasu ciągłego jak i dyskretnego. W sposób syntetyczny przedstawiony został przegląd literatury ze szczególnym uwzględnieniem publikacji związanych ze sterowaniem ślizgowym przekształtników DC/DC zawierających filtr LC - ograniczający zawartość wyższych harmonicznnych w prądzie pobieranym ze źródła zasilającego - dołączony do wejścia

przekształtnika. Zwrócono uwagę na rozwiązania aktywnego tłumienia oscylacji, które umożliwiają minimalizowanie wielkości dławika i kondensatora.

W podsumowaniu, Autor słusznie, stwierdza, że sterowania ślizgowe - dzięki swoim właściwościom - może być efektywnie wykorzystane w sterowaniu przekształtników energoelektronicznych zapewniając odporność na szeroką klasę zakłóceń.

Właściwości układu regulacji są ustalane poprzez wybór zmiennej ślizgowej i zdefiniowanie prawa sterowania.

Materiał przedstawiony w tym rozdziale świadczy o umiejętności przedstawiania i oceniania właściwości regulatorów ślizgowych. Prezentowane opisy są zrozumiałe, a zamieszczane komentarze świadczą o dużej wiedzy Autora w zakresie zagadnień sterowania ślizgowego.

W rozdziale drugim Autor przedstawił cel i tezy pracy. Uznał, że celem podstawowym jest poszukiwanie nowych struktur regulacji wykorzystujących teorię sterowania ślizgowego, które pozwolą na aktywne tłumienie (minimalizowanie) oscylacji w obwodzie wejściowym LC. Dodatkowym warunkiem jest opracowanie algorytmów, które będą możliwe do zaimplementowania w mikrokontrolerach stosowanych w układach sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi.

Sformułowane zostały dwie tezy:

- 1. Dla rozważanego w pracy obniżającego napięcie przetwornika DC-DC z wejściowym filtrem LC, możliwy jest wybór gwarantującej stabilność układu funkcji przełączającej, której argumentami są jedynie wybrane zmienne stanu.**
- 2. Zaproponowany w ten sposób rodzaj regulacji pozwala na aktywne tłumienie oscylacji wejściowego filtra LC, przy nieznacznym pogorszeniu dynamiki uzyskiwanego napięcia wyjściowego.**

Moim zdaniem takie zdefiniowanie zadań badawczych jest poprawne i zgodne z wymaganiami stawianymi pracom doktorskim.

W rozdziale trzecim przedstawiona została synteza regulatora ślizgowego dla przekształtnika DC/DC o topologii obniżającej napięcie bez filtra LC na wejściu. W pierwszej kolejności podany jest model matematyczny dla dwóch stanów pracy. Fizyczne zmienne stanu to prąd w indukcyjności i napięcie na pojemności. Oczywiście możliwe jest wybranie innych zmiennych stanu i Autor dokonuje wyboru zmiennych stanu jako uchybu regulacji (różnica napięcia referencyjnego i napięcia na pojemności wyjściowej) i pierwszej pochodnej tego uchybu. Dalsze przekształcenia matematyczne są prowadzone dla takiego modelu przekształtnika. Została wybrana prosta ślizgowa oraz przeprowadzono obliczenia dla sygnału sterującego $u=1$ (załączenie tranzystora T_1) oraz $u=0$ (wyłączenie tranzystora T_1), przy czym komplementarnie jest sterowany tranzystor T_2 . Brakuje w moim przekonaniu komentarza odnośnie wyboru takiej właśnie zmiennej ślizgowej. Nasuwa się pytanie czy rozważane były inne zmienne ślizgowe?

W rozdziale czwartym zawarty jest najbardziej wartościowy materiał dotyczący syntezy układu regulacji ślizgowej dla przekształtnika DC/DC z wejściowym filtrem LC. Podany został model matematyczny takiego układu, który jest w tym przypadku 4-rzędu.

Autor stwierdza, że analiza pracy układu doprowadziły do wyboru zmiennej ślizgowej opisanej równaniem (4.3). W opisie zmiennej ślizgowej wykorzystane są informacje o uchybie regulacji (napięcia wyjściowego), napięciu na indukcyjności filtra wejściowego oraz pochodną napięcia na pojemności wyjściowej, która jest proporcjonalna do prądu kondensatora. Autor wyznacza następnie sterowanie równoważne przy założeniu, że wartość zmiennej ślizgowej i jej pochodnej po czasie są równe zero.

Przejęcie od zapisu (4.4) do (4.5) nie jest wystarczająco jasne, ponieważ w zapisie (4.5) pojawia się wielkość δ , która nie występuje w równaniu (4.4).

Podobne uwagi dotyczą dalszych opisów związanych z rozważanymi różnymi definicjami zmiennych ślizgowych.

Funkcja opisująca sterowanie równoważne jest nieliniowa i dlatego w kolejnym kroku Autor dokonuje linearyzacji równań opisujących dynamikę zamkniętego układu regulacji.

Ten opis wykorzystywany jest do przeprowadzonych w programie *MATLAB* obliczeń, które pozwoliły na wyznaczenie obszaru zmienności współczynników c_2 i c_3 - występujących w opisie zmiennej ślizgowej - dla których układ będzie stabilny. Zaprezentowane zostały wyniki obliczeń dla 6 różnych wartości rezystora dołączonego do wyjścia przekształtnika. Patrząc na zależności wykorzystywane w analizie stabilności nasuwa się pytanie czy była podjęta próba oceny wrażliwości modelu na zmianę parametrów takich jak wartości indukcyjności i pojemności? W dalszej części Autor wybrał inną zmienną ślizgową (4.10), która zawiera składnik będący różnicą energii pobieranej ze źródła i energii zgromadzonej w pojemności C_1 . Patrząc na wzór (4.10) oraz mając na uwadze pierwszy akapit w podrozdziale 4.1.2 czytelnik może się tylko domyślać, że symbol E oznacza energię kondensatora C_1 . Nie jest jednak podane co kryje się pod symbolem E_{zad} ? (czy jest to energia źródła?).

Analogicznie jak poprzednio Autor analizuje stabilność zamkniętego układu regulacji dla przypadku zmiennej ślizgowej opisanej zależnością (4.10). Efektem przeprowadzonych analiz jest stwierdzenie, że wybór współczynników c_2 i c_3 występujących w opisie zmiennej ślizgowej dla największego obciążenia gwarantuje stabilność układu w przypadku pracy z obciążeniami mniejszymi.

W kolejnym podrozdziale analizowana jest praca przekształtnika DC/DC obniżającego napięcie z filtrem wejściowym LC dla przypadku obciążenia stałą mocą przy zmienności napięcia wejściowego.

Opis matematyczny i analiza właściwości są prowadzone podobnie jak poprzednio. Opis zmiennej ślizgowej został wybrany podobnie jak w pierwszym analizowanym przypadku i dany jest zależnością (4.3). Wniosek wyciągnięty z przeprowadzonych badań stabilności brzmi identycznie jak poprzedni. Wybranie współczynników zmiennej ślizgowej dla największego obciążenia powinno gwarantować stabilność także dla pracy z obciążeniami mniejszymi.

Także w przypadku pracy z obciążeniem o stałej mocy analizowana była stabilność układu dla przypadku wyboru zmiennej sterującej według zapisu (4.10).

Patrząc na opisy matematyczne i przekształcenia występujące w rozdziale 4 nasuwa się pytanie czy nie można podać opisu matematycznego, w którym będzie niezmienna część związana z topologią przekształtnika, a modyfikowany będzie tylko jeden ze składników opisujących zmienną ślizgową?

Autor wykorzystał wyprowadzone w rozdziale 4 zależności matematyczne do budowy modelu symulacyjnego przekształtnika DC/DC o topologii obniżającej napięcie. Materiał dotyczący opisu modelu symulacyjnego i prezentacja wyników badań numerycznych jest przedstawiony w rozdziale piątym. Przedmiotem badań symulacyjnych jest układ przekształtnika DC/DC z filtrem LC dołączonym do wejścia. Opracowane zostały dwie wersje modelu symulacyjnego. Jedna przygotowana w programie *Matlab/Simulink* korzysta z dostępnych w bibliotece standardowych bloków. Druga wersja modelu symulacyjnego została przygotowana z wykorzystaniem pakietu *Power Systems*. Badania zostały przeprowadzone dla układu z nieciągłym sygnałem sterującym jak też układu z ciągłym sygnałem sterującym i modulatorem PWM. Dla porównania wyników wykonano symulacje także dla zmiennej ślizgowej nie zawierającej składnika związanego z filtrem wejściowym.

Prezentowane wyniki badań są analizowane i oceniane pod kątem właściwości dynamicznych i statycznych. Wybrano standardowe sekwencje testowania polegające na skokowej zmianie sygnału referencyjnego oraz po ustalonym czasie, zapewniającym dojście do stanu ustalonego, zmieniono skokowo obciążenia.

Autor stwierdza w komentarzach, że właściwości układów sterowania wykorzystującego zmienną ślizgową ze składnikiem proporcjonalnym do napięcia kondensatora są podobne do tych wykorzystujących zmienną ślizgową ze składnikiem proporcjonalnym do energii kondensatora.

W tym przypadku byłby wskazany nieco rozszerzony komentarz, ponieważ można zauważyć, że energia kondensatora jest zależna od kwadratu napięcia.

Badania przeprowadzone dla układu sterowania z ciągłym sygnałem sterującym wykazały istnienie uchybu ustalonego. W celu sprowadzenia uchybu ustalonego do zera dodano do opisu zmiennej ślizgowej składnik będący całką uchybu regulacji. Przedstawione w rozdziale piątym materiały wskazują na umiejętność modelowania komputerowego i analizowania wyników symulacji.

W układach sterowania przekształtników energoelektronicznych jest najczęściej wybierana struktura sterowania, która umożliwi regulację napięcia z jednoczesnym

nałożeniem ograniczenia na wartość maksymalną prądu przekształtnika. Czy jest możliwe wprowadzenia takich ograniczeń w regulatorze ślizgowym?

W rozdziale szóstym zamieszczono opis stanowiska laboratoryjnego ze sterowaniem realizowanym z wykorzystaniem karty dSPACE oraz wyniki badań dla wybranych sterowań i zmian obciążenia. Zamieszczone wyniki są analizowane i oceniane pod względem właściwości regulacyjnych. Komentowane są także rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji i eksperymentu.

W celu oceny właściwości regulacyjnych układu postanowiono wykorzystać wskaźnik jakości *ISE* (*Integral Squared Error*).

Oceniane zostały następujące sygnały:

- uchyb napięcia wejściowego (różnica napięcia źródła i napięcia kondensatora filtra wejściowego)
- uchyb prądu wejściowego (różnica pomiędzy przeliczonym na stronę pierwotną prądem dławika L_2 i prądem dławika L_1)
- uchyb napięcia wyjściowego (różnica wartości referencyjnej i napięcia na kondensatorze wyjściowym)

Zamieszczona została graficzna postać reprezentująca wyniki obliczeń dla tak zdefiniowanych wskaźników jakości.

Należy pozytywnie ocenić fakt, że Autor przeprowadził pełen cykl badań - standardowy w obszarze nauk technicznych - czyli zdefiniowanie zadania badawczego, przeprowadzenie analiz z wykorzystaniem odpowiednio wybranych narzędzi matematycznych, przygotowanie modeli symulacyjnych oraz wykonanie eksperymentu.

Do najważniejszych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- Opracowanie (autorskich) kilku wersji zmiennych ślizgowych i przeprowadzenie analizy stabilności proponowanych regulatorów po przeprowadzeniu linearyzacji układu zamkniętego.
- Przygotowanie modeli symulacyjnych układu dla ciągłego i nieciągłego prawa sterowania oraz wybranych zmiennych ślizgowych.
- Zbudowanie stanowiska laboratoryjnego i weryfikacja eksperymentalna wybranych struktur regulacji w różnych warunkach pracy.

3. Uwagi dotyczące zagadnień edytorskich

Pod względem językowym jest napisana poprawnie aczkolwiek występują określenia żargonowe takie jak np. „klucz”, a nie „łącznik energoelektroniczny” czy też używana jest nazwa „przetwornik DC-DC” zamiast poprawnej „przekształtnik energoelektroniczny”.

Niektóre z zamieszczonych rysunków, ze względu na wielkość bloków graficznych i czcionki opisów, są słabo czytelne.

4. Wniosek końcowy

Sformułowane powyżej uwagi dyskusyjne nie zmieniają pozytywnej oceny pracy. Praca stanowi dojrzałe przedstawienie zagadnień sterowania ślizgowego wykorzystanego w sterowaniu przekształtnika DC/DC o topologii obniżającej napięcie i stanowi oryginalny wkład Autora do teorii i praktyki w obszarze projektowania regulatorów rozmytych. Autor wykazał się znajomością zagadnień z dyscypliny „Automatyka i Robotyka”, umiejętnością formułowania celów badawczych oraz analizowania wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Uzyskane rezultaty mogą być pomocne w dalszych pracach badawczych, a także aplikacjach przemysłowych. W szczególności należy docenić fakt wykonania wielu badań symulacyjnych i badań laboratoryjnych dokumentujących właściwości zaproponowanych algorytmów.

Moim zdaniem rozprawa doktorska - mgr. inż. *Karola Tatara* pt. „*Synteza regulatorów ślizgowych dla przetworników energoelektronicznych ze słabo tłumionymi wejściowymi filtrami LC*” spełnia wymagania stawiane przez „*Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65 Poz. 596) z późniejszymi zmianami*” i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Warszawa, 27-08-2019

