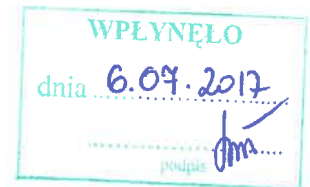


Białystok, 29 czerwca 2017 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Sikorski, prof. zw.
Katedra Energoelektroniki i Napędów Elektrycznych
Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok



Ocena rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Dziwińskiego pt.:

"Wybrane metody cyfrowego przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym w układach sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi" (Selected methods of real-time digital signal processing for control of the power electronic converters)

(zlecenie z dnia 06.04.2017 r., na podstawie Uchwały Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 30 marca 2017 r.)

1. Ogólna charakterystyka rozprawy, przedmiot i cel rozprawy

Przekształtniki energoelektroniczne są powszechnie stosowane do zasilania układów napędowych z maszynami prądu stałego i zmiennego, a także w układach z odnawialnymi źródłami energii elektrycznej (EE) oraz w inteligentnej sieci elektroenergetycznej (*smart grid*) do poprawy jakości EE. Jednym z powszechnie stosowanych elementów oceny przekształtników energoelektronicznych, istotnych z punktu widzenia użytkownika, jest upakowanie czy też gęstość mocy (*power density*). Na wysoką gęstość mocy wpływają użyte elementy półprzewodnikowe, elementy bierne (dławiki, kondensatory), sterownik, a także metoda sterowania minimalizująca częstotliwość łączy (strat łączy), przy uzyskaniu określonych właściwości układu. Jako przykład przekształtnika, którego syntezą regulatorów zajmował się Autor, był najprostszy z przekształtników energoelektronicznych tzw. przekształtnik DC/DC obniżający napięcie (*buck converter*). Strukturę sterowania i jej sprzętową implementację można zrealizować przy użyciu różnych cyfrowych struktur regulacyjnych. W pracy doktorskiej Autor proponuje sterowanie z regulacją napięcia wyjściowego zrealizowaną w środowisku FPGA. Zastosował złożone regulatory: H_{∞} 4-go rzędu oraz regulator typu Lead-Lag. Zaprojektował, niezbędne z punktu widzenia działania regulatorów, przetworniki AD i DA, a także filtry i zaimplementował je w strukturze FPGA uzyskując niezawodne i kompaktowe sterowanie.

Można więc stwierdzić, że w recenzowanej rozprawie Autor podjął aktualny, niebanalny z poznawczego punktu widzenia problem badawczy, który potencjalnie ma istotne znaczenie praktyczne i który nie został dotychczas rozwiązany w sposób

AS

ostateczny i jednoznaczny.

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Dziwińskiego zawiera 128 stron i została zredagowana w 5 rozdziałach. Zdaniem recenzenta, przyjęty przez Autora układ treści rozprawy jest wystarczająco jasny i klarowny, podział rozprawy na rozdziały prawidłowy, a rozdział wstępny i końcowy zawierają właściwe treści. Szczegóły dotyczące budowy stanowiska laboratoryjnego Autor zamieścił w dodatku (na końcu rozprawy), nie zaburzając tym samym podstawowej struktury pracy.

Rozdział 1 recenzowanej rozprawy („Introduction”), oprócz opisu motywacji do podjęcia badań i prezentacji tez rozprawy doktorskiej, zawiera również przegląd tematyki badawczej, w której są umiejscowione problemy podjęte przez Autora i opisane w rozprawie. W tym rozdziale została również zaprezentowana struktura pracy oraz lista oryginalnych osiągnięć Autora opisanych w recenzowanej rozprawie.

W rozdziale 2, opartym na literaturze, przedstawiono elementarne informacje z energoelektroniki i podstawy działania przekształtnika DC/DC oraz jego model matematyczny. Zaproponowane zostały również wskaźniki i kryteria oceny jakości prądu i napięcia wyjściowego.

W rozdziale 3 Autor charakteryzuje część sterującą przekształtnika. Zajmuje się projektowaniem układów sterowania, począwszy od przetwarzania analogowo-cyfrowego poprzez uśredniający filtr cyfrowy, dobór regulatora, do zaprojektowania modulatora sygnału sterującego łącznikiem. Przy doborze regulatora, uwzględniono wpływ niepewności parametrycznej modelu obiektu na stabilności systemu w założonym zbiorze niepewności obiektu. Rozważania te stanowią oryginalny dorobek Autora.

W kluczowym, ze względu na zawartość merytoryczną i istotne osiągnięcia Autora, rozdziale 4 przedstawiono proces projektowania układu sterowania. Dokonano identyfikacji obiektu na podstawie odpowiedzi częstotliwościowej, a wynik porównano z symulacyjną charakterystyką Bodego dla modelu numerycznego. Następnie przeprowadzono dobór i strojenie regulatorów w środowisku do symulacji numerycznych MATLAB/Simulink. Autor wybrał dwa typy regulatorów: H^∞ 4-go rzędu oraz regulatorem typu Lead-Lag, które z założenia powinny spełniać określone parametry: błąd ustalony, pasmo przenoszenia, zapas fazy, zapas amplitudy oraz wskaźniki dotyczące wrażliwości. Po weryfikacji prototypów regulatorów opisanych w dziedzinie ciągłego czasu, regulatory zostały zdyskretyzowane z okresem próbkowania 20 μ s. Kompletnie sterowanie zaimplementowano w układzie FPGA i zweryfikowano badaniami eksperymentalnymi zrealizowanymi na stanowisku badawczym. Przetestowano odpowiedź częstotliwościową układu zamkniętego i porównano z odpowiedzią modelu symulacyjnego. Przeanalizowano widmo napięcia wyjściowego i porównano z widmem napięcia zasilającego obiekt, które zostało zniekształcone tętnieniami wynikającymi z zasilacza - jednofazowego prostownika diodowego. Przeprowadzono również badania odpowiedzi na skok wartości zadanej napięcia oraz odpowiedzi na skokową zmianę prądu wyjściowego odbiornika.

Pracę (rozdział 5) kończą podsumowanie i wnioski dokumentujące dowód postawionej tezy i najważniejsze osiągnięcia Autora. Kończącą część pracy stanowi

bibliografia i dodatek z fotografiami elementów składowych przekształtnika i wybrane schematy elektryczne.

2. Ocena merytoryczna i wykaz najważniejszych osiągnięć Autora

Rozprawa stanowi po części oryginalne i kompletne rozwiązanie zagadnień badawczych, projektowych i konstrukcyjnych związanych z realizacją sterowania przekształtnika DC/DC obniżającego napięcie. Należy podkreślić, że praca została wykonana w pełnym cyklu badawczym, tj. od opracowania teoretycznego, poprzez analizę i testy symulacyjne do zbudowania stanowiska laboratoryjnego i weryfikację doświadczalną. Autor zaproponował weryfikację następujących hipotez badawczych:

- dostosowanie algorytmów sterowania przekształtnikami elektroenergetycznymi do warunków realizacji na dedykowanych platformach sprzętowych może poprawić jakość i pewność dostarczanej energii elektrycznej,
- pomimo złożonego charakteru algorytmów sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi możliwa jest efektywna implementacja w czasie rzeczywistym w środowisku FPGA/DSP.

Obie zaproponowane przez Autora tezy są trywialne. Pierwsza „teza” - twierdzenie, postawione w formie warunkowej („może”) nie spełnia definicji „tezy”. Ponadto w zaproponowanej formie spełnia je każde nowo zbudowane urządzenie energoelektroniczne, a więc i to zbudowane przez Autora. Gdyby usunąć słowo „może”, a więc spełnić wymóg definicji „tezy”, to zdaniem recenzenta Autor nie udowodnił w pracy tezy. Drugą tezę dowodzi w zasadzie każdy nowo zbudowany przekształtnik, gdyż praktycznie wszystkie bardziej złożone konstrukcje mają zaimplementowane algorytmy sterowania na platformach FPGA/DSP przy czym różnią się podziałem zadań pomiędzy strukturę FPGA i procesor DSP. Autor zaimplementował sterowanie w strukturze FPGA co stanowi pewne osiągnięcie o charakterze inżynierskim (raczej nienaukowym!). W literaturze można znaleźć o wiele bardziej skomplikowane algorytmy, np. z przekształtnikami 3-fazowymi zasilającymi silniki, sterowanymi złożonymi metodą z odtwarzaniem zmiennych stanu (moment, prędkość, strumień), zrealizowane w strukturze FPGA. W ocenie recenzenta, praca równie dobrze prezentowałaby się przy braku tez badawczych z obszernie wypunktowanymi celami pracy, które potwierdzają niżej przedstawione wyniki.

Oryginalne wyniki rozprawy to:

- opracowanie i implementacja cyfrowego sterowania przekształtnika energoelektronicznego DC/DC obniżającego napięcie, zrealizowanego w technologii FPGA w tym: projekt i realizacja matrycy FPGA z przetwornikami analogowymi, ADC, światłowodowej transmisji sygnałów sterujących i jego oprogramowanie,
- opracowanie modeli symulacyjnych i symulacje przekształtnika z zaproponowanym sterowaniem,

- projekt i realizacja dwóch nieliniowych regulatorów typu Lead-Lag i H^∞ oraz ich badania symulacyjne w układzie rzeczywistym w wybranych stanach pracy,
- projekt i budowa przekształtnika DC/DC obniżającego napięcie, sterowanego z wykorzystaniem regulatorów nieliniowych zrealizowanych w technologii FPGA,
- realizacja stanowiska do badania stanów statycznych i dynamicznych oraz zmiany obciążenia przekształtnika DC/DC,
- badania symulacyjne i testy laboratoryjne przekształtnika.

Należy podkreślić, że Autor samodzielnie zaprojektował, zaprogramował i uruchomił złożony, ze względu na użyte regulatory, układ sterowania przekształtnika DC/DC. Uruchomienie takiego układu, przeprowadzenie badań symulacyjnych i doświadczalnych, a także opracowanie teoretyczne badanych zagadnień dowodzi, że Autor posiadał ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie naukowej „Automatyka i Robotyka”. Autor rozwiązał samodzielnie zagadnienie naukowe, odpowiednio sformułował założenia, wybrał i zastosował właściwe metody teoretyczne i doświadczalne oraz udokumentował to wynikami zamieszczonymi w rozprawie. Przy czym, zdaniem recenzenta, część założeń i badań laboratoryjnych skażone jest podejściem typowym dla automatyki, które nie zawsze przystaje do realiów dotyczących pracy urządzeń energoelektronicznych. Ponadto nie wszystkie przeprowadzone testy, być może interesujące z punktu widzenia automatyki, mają znaczenie dla oceny urządzenia energoelektronicznego. Szczegółowe omówienie wyżej sygnalizowanych problemów znajduje się w kolejnym rozdziale „Uwagi dyskusyjne i komentarze do rozprawy”.

Ogólna ocena sposobu i jakości rozwiązania sformułowanych zadań badawczych jest umiarkowanie pozytywna. Na uwagę zasługuje fakt, że analizy teoretyczne i proponowane algorytmy sterowania zostały poparte dobrze udokumentowanymi w rozprawie badaniami symulacyjnymi i testami laboratoryjnymi. Jednakże, jak w każdej pracy naukowej, niektóre problemy i wątki nie zostały w rozprawie opisane w sposób dostatecznie dogłębny, przejrzysty i wyczerpujący. Szczegółowa lista wątków, które budzą pewne wątpliwości i komentarze recenzenta, została przedstawiona w kolejnym rozdziale recenzji.

3. Uwagi dyskusyjne i komentarze do rozprawy

Lektura rozprawy nasunęła szereg wątpliwości nie umniejszającym osiągnięciom Autora, przedstawionych poniżej i wymagających ustosunkowania się do nich Autora.

1. Regulatory zaproponowane w pracy, ze względu na ich strukturę, należy uznać za złożone. Jednakże Autor nie porównał ich właściwości z prostszymi, np. stosowanymi w praktyce typu PI, lub innymi spotykanymi w literaturze, więc nie sposób ocenić, jaki jest sens stosowania zaproponowanych rozwiązań. Brak porównania znanych z literatury i zaproponowanych rozwiązań układu sterowania stanowi istotną wadę dysertacji. Wynika to z ubogiej bibliografii (zwłaszcza artykułów) dotyczącej problemu sterowania *DC/DC buck convertera*.
2. Zaproponowana struktura regulatora napięcia, bez regulatora prądu, jest nie do

przyjęcia ze względu na charakter odbiornika (np. silnik DC, źródła odnawialne) i konieczność jego ochrony.

3. Autor przyjął, że odbiornikiem jest rezystor i nie byłoby w tym nic złego pod warunkiem, że przyjąłby odpowiedni zakres jego zmienności. Przekształtnik energoelektroniczny musi mieć możliwość pracy przy biegu jałowym (tzn. $R=\infty$) jak również przy przeciążeniach. Ten pierwszy warunek nie został spełniony, gdyż przyjęto założenie (3.21), określające zbyt wąski zakres zmian rezystancji odbiornika. Ponadto immanentnym elementem testów przekształtnika, jest start (rozruch) układu przy różnym obciążeniu, w tym na biegu jałowym, którego zabrakło zarówno w symulacjach jak i w testach laboratoryjnych.
4. Wyniki badań laboratoryjnych są niepełne w odniesieniu do badania układu przekształtnika i jego sterowania. Brak badań przy małosygnałowych zmianach wielkości regulowanych (tak aby regulator nie wchodził w nasycenie), pozwalających na właściwe badanie regulatora (niestety Autor stwierdza, że nie ma informacji na temat stanu regulatora tj. czy pracuje on w stanie aktywnym, czy jest nasycony). Stany przejściowe trudno ocenić, gdyż nie ma z czym porównać (brak znanej metody referencyjnej) ani co do czasu regulacji ani przeregulowań. Rysunki 4.30, a zwłaszcza 4.29 wskazują, że w stanie ustalonym w przedziale czasu 0,017s do 0,02s (również w układzie otwartym) występuje widoczny uchyb ustalony wynoszący co najmniej kilka woltów. Tabela 4.6 wskazuje na dużo mniejsze uchyby ustalone – jak to wyjaśnić? Autor powinien uzasadnić sens prowadzenia badań i wykreślenia przedstawionych na rysunkach 4.24, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 charakterystyk z punktu widzenia pracy przekształtnika DC/DC w rzeczywistym układzie.
5. Autor przeprowadził szereg testów, zarówno symulacyjnych (rys. 4.5 - 4.9) jak i laboratoryjnych (rys. 4.16, 4.24, 4.23 (zamieniona kolejność rysunków?)), które z punktu widzenia kryteriów automatyki potwierdzają np. stabilność układu. Można by przeprowadzić testy rzeczywistego układu, pobudzonego odpowiednimi sygnałami o zmiennej częstotliwości np. zadanego napięcia, które realnie pokazałyby odpowiedzi i potwierdziły stabilność układu.
6. Wnioski dotyczące prostego przeniesienia struktury regulacji i doświadczeń z budowy układu sterowania na inne przekształtniki energoelektroniczne są zbyt daleko idące. Recenzent nie widzi podstaw do takiego wniosku na podstawie znanej literatury dotyczącej tej tematyki.
7. Pewien niedosyt, nie do końca o charakterze merytorycznym, stanowi rozdział 1.4 *State of the art*. Autor powinien przedstawiać stan wiedzy dotyczący głównych, merytorycznych nurtów rozważań Autora, a więc dotyczyć sterowania przekształtnika DC/DC obniżającego napięcie oraz znanych z literatury rozwiązań używanych regulatorów i ich własności, które można by porównać z zaproponowanym przez Autora rozwiązaniem. Niestety jego zawartość nie spełnia tego warunku, co wywołuje już na wstępie czytania pracy pewien niedosyt.

Strona edycyjna rozprawy nie budzi żadnych zastrzeżeń.

4. Podsumowanie oceny rozprawy doktorskiej

Doktorant podejmuje problem o niewątpliwie istotnym znaczeniu praktycznym, wnosi oryginalny wkład intelektualny w postaci modyfikacji sterowania prostej konfiguracji przekształtnika energoelektronicznego. Przeprowadza również wszechstronne symulacje działania zaproponowanych algorytmów i proponowanych modyfikacji oraz praktycznie weryfikuje swoje propozycje.

Zdaniem recenzenta, Autor udowodnił niefortunnie sformułowane na str. 14 tezy rozprawy. Z dużą starannością przeprowadził proces projektowania i realizacji wybranych, złożonych struktur regulatorów. Przedstawił też badania laboratoryjne zrealizowanego prostego przekształtnika energoelektronicznego z zaproponowaną prostą strukturą sterowania z wykorzystaniem złożonych regulatorów.

Opiniowana rozprawa mgr. inż. Tomasza Dziwińskiego pt.: "Wybrane metody cyfrowego przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym w układach sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi" (Selected methods of real-time digital signal processing for Control of the power electronic converters) stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie technicznie nietrywialnego problemu badawczego. Świadczy o dobrym przygotowaniu Autora, zarówno w zakresie automatyki i energoelektroniki.

Stwierdzam, że opiniowana praca spełnia w dostatecznym stopniu warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 13 pkt.1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 poz. 595 z późn. zm.) oraz stosownych rozporządzeniach i przepisach wykonawczych.

Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Tomasza Dziwińskiego do publicznej obrony przed Radą Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Andrzej Sikorski