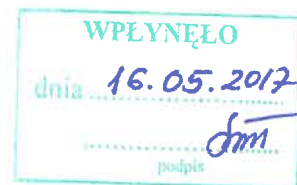


Łódź, 08.05.2017 r.

Dr hab. inż. Jacek Kabziński, prof. PŁ
Instytut Automatyki Politechniki Łódzkiej
ul. Stefanowskiego 18/22
90-924 Łódź



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Dziwińskiego
pt. „Wybrane metody cyfrowego przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym w układach sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi”
opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

1. Postać rozprawy i forma przedstawionych wyników

Rozprawa doktorska przedstawiona do oceny liczy 128 stron, zawiera spis akronimów, symboli, pięć rozdziałów, dodatek prezentujący konstrukcję zrealizowanego przekształtnika. Rozprawa jest napisana w języku angielskim, zaopatrzona w streszczenie w języku polskim. Spis literatury zawiera 63 pozycje, w większości cytowane w tekście rozprawy. Jest wśród nich 5 publikacji, których współautorem jest p. mgr inż. Tomasz Dziwiński, dwie z nich ([18,19]) odnoszą się do wyników badań przedstawionych w rozprawie.

Praca wyróżnia się niezwykłą starannością redakcji. Język jest niemalże perfekcyjny, a jednocześnie jasny i komunikatywny. Usterek i literówek jest tak mało, że przekazałem je bezpośrednio autorowi i zrezygnowałem z umieszczania ich na końcu recenzji. Wykresy i rysunki są dobrej jakości, właściwie dobrane i dobrze opisane.

2. Ocena tematyki rozprawy i zastosowanych metod badawczych

Przedmiotem badań przedstawionych w rozprawie jest zastosowanie cyfrowych algorytmów sterowania w energoelektronicznych układach impulsowych o wysokich częstotliwościach pracy łączników. Temat rozprawy jest bardziej tematem monografii niż rozprawy doktorskiej, ale autor szybko zawęża obszar swoich dociekań do przekształtników obniżających napięcie (typu „buck”) i do dwóch metod sterowania – klasycznego kompensatora przyspieszającego i opóźniającego fazę oraz kompensatora realizującego sterowanie typu H_{∞} . Autor formułuje dwie tezy rozprawy:

1. Dostosowanie algorytmów sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi do warunków realizacji na dedykowanych platformach sprzętowych może poprawić jakość i pewność dostarczanej energii elektrycznej.
2. Pomimo złożonego charakteru algorytmów sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi jest możliwa efektywna implementacja w czasie rzeczywistym w środowisku FPGA/DSP.

Tezy te są dość ogólne, ale dobrze definiują obszar rozprawy. Istotnym elementem oceny musi być odpowiedź nie tylko czy, ale w jaki sposób zostały udowodnione.

Autor postawił sobie cel polegający na weryfikacji modelu przekształtnika obniżającego napięcie, zaprojektowaniu na podstawie tego modelu układu sterowania i pełnej realizacji tego sterowania w wybranej technice. Autor słusznie kładzie nacisk na odporność (rozumianą w terminach teorii sterowania) zaproponowanego układu regulacji napięcia i temu celowi podporządkowuje wybór dwóch sposobów sterowania omówionych w rozprawie.

Niewątpliwie, przekształtniki energoelektroniczne są bardzo interesującymi obiektami sterowania, i to w wielu aspektach. Ich modelowanie obejmuje trudny problem opisu zjawisk nieciągłych w czasie - jak praca łączników półprzewodnikowych. Sterowanie jest wyzwaniem z uwagi na obecność zakłóceń, zmienność parametrów, rozbieżności między uproszczonym modelem a rzeczywistym urządzeniem. Ewidentna jest też praktyczna przydatność sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi w rozlicznych zastosowaniach praktycznych.

Przekształtniki są konstruowane dla potrzeb bardzo różnych zastosowań, które obejmują na przykład urządzenia mobilne, pojazdy elektryczne, układy przetwarzania energii ze źródeł odnawialnych i wiele innych. Parametry konstrukcyjne przekształtników oraz wymagania nakładane na ich pracę mogą być bardzo różne w zależności od przeznaczenia. Badania zaprezentowane w rozprawie są weryfikowane przez symulacje i eksperymenty laboratoryjne dotyczące przekształtnika zasilanego ze źródła 220V o niewielkiej mocy, i trudno jest przyjąć, że wyniki i wnioski są uniwersalne dla wszystkich przekształtników typu „buck”. Warto byłoby pokusić się o określenie klasy przekształtników (rodzaju łączników, zakresu mocy i częstotliwości), do których można z zaufaniem stosować wyniki przedstawione w rozprawie.

Literatura dotycząca sterowania przekształtnikami, nawet ograniczona tylko do przekształtników typu „buck”, jest olbrzymia. Baza IEEE Xplore za lata 2010-2017 podaje 5000 publikacji zawierających hasło „buck converter”. Oczywiście niemożliwe jest przeanalizowanie całej, tak bogatej bibliografii, ale rozdział 1.4 *State of the art* pozostawia pewien niedosyt. Autor koncentruje się na historycznym aspekcie metod sterowania

przekształtnikami i na pracach wykorzystujących sterowanie typu H_∞ , a warto byłoby odnieść się do innych metod sterowania, które też zapewniają pewną odporność układu. Mam tu na myśli choćby metody wymienione w monografii *Control Design Techniques in Power Electronics Devices*, Hebertt Sira-Ramírez, Ramón Silva-Ortigoza, Springer 2006: lokowanie biegunów bez i z zastosowaniem obserwatorów, regulatory GPI (Generalized Proportional Integral), regulator PD, sterowanie wykorzystujące pasywność układu, sterowanie ślizgowe. Zwłaszcza to ostatnie oraz sterowanie predykcyjne staje się coraz bardziej popularną metodą sterowania przekształtnikami obniżającymi napięcie. Powstaje też wiele metod dedykowanych specjalnie dla przekształtników, często na pograniczu rozwiązań sprzętowych i algorytmów sterowania, które, według ich twórców, charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami, np.

- *A New Buck Converter With Optimum-Damping and Dynamic-Slope Compensation Techniques*, Jiann-Jong Chen, Yuh-Shyan Hwang, Jian-Fong Liou, Yi-Tsen Ku, and Cheng-Chieh Yu, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 64, NO. 3, MARCH 2017,
- *A Peak-Capacitor-Current Pulse-Train-Controlled Buck Converter With Fast Transient Response and a Wide Load Range*, Jin Sha, Duo Xu, Yiming Chen, Jianping Xu, and Barry W. Williams, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 63, NO. 3, MARCH 2016.

Przy wszystkich naturalnych ograniczeniach tematu rozprawy należy pokreślić, że podjęcie kolejnych badań w obszarze sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi jest wartościową inicjatywą. Szczególnie cieszy mnie fakt, że badania zaprezentowane w rozprawie wychodzą od algorytmów sterowania i prowadzą do ich skutecznej aplikacji, co nigdy nie jest banalnym problemem. Doktorant wykonał pełny cykl badawczy od etapu modelowania, poprzez projektowanie algorytmu sterowania do jego cyfrowej realizacji w układzie laboratoryjnym, na każdym etapie stosował wachlarz dobrze dobranych metod badawczych.

Każda praca, która wypełnia lukę między teorią sterowania a praktyką jest cenna i oczekiwana. Konkludując mogę stwierdzić, że rozprawa dotyczy aktualnej tematyki, o rosnącym potencjale zastosowań. Badania doskonale lokują się w dyscyplinie automatyka i robotyka.

3. Charakterystyka rozprawy i ocena uzyskanych wyników

Pierwszym etapem badań zaprezentowanych w rozprawie było dobranie odpowiedniego modelu przekształtnika (rozdział 2 *Power Converter Models*). Wybór przekształtnika obniżającego napięcie ułatwia sprawę, bo w tym przypadku można z powodzeniem zastosować

model liniowy. Taki model drugiego rzędu, zgodny z powszechnie przyjętą praktyką, zostaje wyprowadzony przez Autora w postaci równań stanu i transmitancji. Autor nie korzysta z normalizacji modelu, czyli np. wyboru zmiennych stanu w postaci $x_1 = \frac{1}{U_g} \sqrt{\frac{L}{C}} \langle i_L \rangle_{T_s}$, $x_2 = \frac{1}{U_g} \langle u_C \rangle_{T_s}$, który dla $R_L \rightarrow 0$ pozwala zapisać model z jednym tylko parametrem $Q = R_o \sqrt{\frac{C}{L}}$ i uniezależnić się od zakresu napięcia. Takie postępowanie jest uzasadnione jeśli zakłada się zmienność U_g .

Ważnym elementem wyprowadzenia modelu jest proces uśredniania sygnałów, opisany operatorem (2.5)¹. W przypadku liniowego modelu przekształtnika operacja ta nie budzi wątpliwości. W rozdziale 2.3 *First quadrant choper DC motor drive* Autor próbuje zastosować operator (2.5) do układu nieliniowego. Dość zdawkowy sposób przejścia od równań (2.31) do (2.32) może sugerować, że są one matematycznie równoważne. Tak nie jest ($\langle i_m \omega \rangle_{T_s} \neq \langle i_m \rangle_{T_s} \langle \omega \rangle_{T_s}$). Problem zastąpienia równania $\frac{d}{dt}x = f(x, u)$ równaniem $\frac{d}{dt}\langle x \rangle_{T_s} = f(\langle x \rangle_{T_s}, \langle u \rangle_{T_s})$ jest interesujący i wymaga komentarza.

Rozdział 3 *Digital Control Techniques for Power Converters* zawiera podstawy teoretyczne i uzasadnienie algorytmów przetwarzania sygnałów i sterowania wybranych przez doktoranta do implementacji na stanowisku laboratoryjnym. We wprowadzeniu do tego rozdziału (str. 37-39) Autor tłumaczy dlaczego wybrał regulatory liniowe i słusznie przedstawia dwie drogi do zaprojektowania regulatora zrealizowanego cyfrowo (rys. 3.2). Jednak krótkie zdanie „*The continuous-time control system is usually better to asses stability, robustness and performance, therefore the indirect method is preferred...*”, które ma uzasadnić wybrany sposób projektowania – synteze ciągłego regulatora na podstawie ciągłego modelu, wydaje się zbyt lakoniczne i pochopne. Nie jest to wcale pogląd powszechny, ani w przypadku sterowania przekształtnikami, ani w dla układów H_∞ (np. *A Unified Framework for Analysis and Design of a Digitally Current-Mode Controlled Buck Converter, Amit Kumar Singha, Santanu Kapat, IEEE Transactions on Circuits, Vol: 63 Issue: 11*, oraz *H ∞ Control for Discrete-Time Systems by Quantized State Feedback, Wei-Wei Che and Guang-Hong Yang, Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control New Orleans, LA, USA, Dec. 12-14, 2007*) i szerszy komentarz na temat możliwości zrealizowania celów projektu na podstawie dyskretnego modelu przekształtnika byłby bardzo pożądanym.

¹ w tym wzorze trzeba inaczej oznaczyć zmienną całkowania

W kolejnych punktach omówione są metody przetwarzania sygnałów wykorzystane w rozprawie: przetwornik sygnału analogowego w cyfrowy i dyskretny filtr uśredniający. Choć zastosowane tu rozwiązania są klasyczne, to przedstawiona analiza błędów i właściwości częstotliwościowych w kontekście sterowania przekształtnikiem jest wartościowa.

W dalszej części rozdziału opisano proces projektowania odpornych regulatorów przekształtnika. Wyjaśniono miary odporności w kontekście niezamodelowanej dynamiki i niepewnych parametrów. Wyprowadzono faktoryzację modelu przekształtnika pozwalającą na zastosowanie odpowiedniej metody projektowania układu H_∞ . Wybór odpowiednich transmitancji wagowych, który pozwala na zrealizowanie celów sterowania przy ograniczonym stopniu skomplikowania regulatora H_∞ należy także uznać za istotny rezultat rozprawy. Do samego projektowania regulatora Autor wykorzystuje gotową funkcję `hinfsyn` Matlaba (cały proces sprowadza się więc do jednej linijki kodu), nie tłumacząc się zbytnio z wyboru metody ani z doboru parametrów (np. `GMAX` i `GMIN` w listingu 3.2).

Przedstawiono także proces projektowania kompensatora przyśpieszającego i opóźniającego fazę, jak rozumiem iteracyjną metodą prób i błędów.

Jako część kompensatora opóźniająca fazę zastosowano regulator PI. Choć nie jest to jasne w tym momencie rozprawy także w kompensatorze H_∞ można spodziewać się elementu całkującego i stąd konieczność zastosowania metody ograniczającej wind-up integratora. Metodę taką, prawidłowo dobraną, opisano w kolejnym punkcie rozdziału 3.

W końcu podano zasady dwóch sposobów modulacji – modulację szerokości impulsów i tzw. delta-modulator, które zostaną wykorzystane w pracy. Dokonano krótkiej analizy właściwości tych metod.²

Rozdział 4 stanowi zwięźczenie rozprawy. Autor słusznie rozpoczyna od badań symulacyjnych wykorzystując Simscape i Simulink'a. Formułuje oczekiwane właściwości układu regulacji (tabela 4.2) i zgodnie z metodami przedstawionymi w rozdziale 3 projektuje regulatory zapisane we wzorach (4.4) i (4.5). Właściwie należałoby sprawdzić warunki konieczne istnienia rozwiązania dla kompensatora H_∞ (stabilizowalność i wykrywalność odpowiednich par macierzy), ale przyjmijmy, że jest to oczywiste. Uderza we wzorach (4.4) i (4.5), a potem (4.7) i (4.8) duża dokładność parametrów, zwłaszcza w stosunku do nominalnych parametrów układu, które zapisano (tabela 4.1) przy użyciu co najwyżej 3 cyfr znaczących. Czy faktycznie wyniki są tak wrażliwe na parametry regulatora, że konieczne jest zastosowanie tak

² W rozdziale 3: objaśnienia oznaczeń $\hat{}$ wymaga wzór (3.31), korekty wymaga wzór (3.54), przydałoby się szersze wyjaśnienie jak wykorzystywano nierówność (3.52).

precyzyjnych wartości? Z jaką precyzją zostaną te współczynniki odwzorowane w rzeczywistym układzie?

Następnie ciągłe regulatory są dyskretyzowane. Opis tego procesu (str. 45) nie jest do końca jasny. Prawdopodobnie zastosowano aproksymację Tustin ($G(z) = G(s)|_{s=\frac{z-1}{T}}$??) i wyznaczono minimalną realizację transmitancji dyskretnej. Dlaczego nie zastosowano dokładnej dyskretyzacji (mam na myśli taką, w której macierz stanu układu dyskretnego $A_{dyskr} = e^{A_{ciąg}T_{próbkowania}}$), skoro były już obliczone macierze z równań stanu układu ciągłego? Jaki był czas próbkowania? Ten etap projektowania wymaga dokładniejszego opisu.

Następnie opisano proces implementacji regulatora w układzie FPGA. Ten etap, choć opisany dość krótko jest świadectwem dużych umiejętności doktoranta, potwierdza sensowność zaproponowanego algorytmu i możliwości jego implementacji także na innych platformach cyfrowych.

W ostatniej części rozdziału opisano badania przeprowadzone na skonstruowanym przez p. Tomasza Dziwińskiego przekształtniku. Rys. 4.15 pokazuje, że charakterystyka zastosowanej cewki jest nieco nieliniowa. Wiele wyników (np. wnioski rys. 4.16) opiera się na zdjętych eksperymentalnie charakterystykach częstotliwościowych. Przydałoby się wyjaśnienie w jaki sposób były one zdejmowane i czy mierzono przy tym zawartość wyższych harmonicznych w sygnale wyjściowym.

Przedstawione wyniki potwierdzają prawidłowe działanie układu. Autor sugeruje pewną wyższość regulatora H_∞ nad kompensatorem lead-lag. Nie w każdym przypadku jest to prawda. Na przykład przeregulowanie przy zmianie obciążenia (rys. 4.31 i 4.32) jest mniejsze dla tego ostatniego.

Jestem pewien, że poza opisanymi w pracy, Autor przeprowadził znacznie więcej eksperymentów symulacyjnych i badań układu laboratoryjnego. Ciekawe byłoby porównanie właściwości śledzących układów (przy różnych, zmiennych trajektoriiach napięcia zadanego). Bardzo interesujące byłoby porównanie pracy zaproponowanego układu z możliwościami komercyjnych przekształtników.

W treści recenzji pozwoliłem sobie sformułować prośby o skomentowanie lub wyjaśnienie pewnych kwestii (które podkreśliłem). Dla ułatwienia zestawiam je ponownie:

1. Poproszę o określenie klasy przekształtników (rodzaju łączników, zakresu mocy i częstotliwości), do których można z zaufaniem stosować wyniki przedstawione w rozprawie.

2. Problem zastąpienia równania $\frac{d}{dt}x = f(x, u)$ równaniem $\frac{d}{dt}\langle x \rangle_{T_s} = f(\langle x \rangle_{T_s}, \langle u \rangle_{T_s})$ wymaga komentarza.
3. Poproszę o szerszy komentarz na temat możliwości zrealizowania celów projektu na podstawie dyskretnego modelu przekształtnika.
4. Czy faktycznie wyniki są tak wrażliwe na parametry regulatora, że wymagane jest zastosowania tak precyzyjnych wartości tych parametrów? Z jaką precyzją zostaną te współczynniki odwzorowane w rzeczywistym układzie?
5. Dlaczego nie zastosowano dokładnej dyskretyzacji (mam na myśli taką, w której macierz stanu układu dyskretnego $A_{dyskr} = e^{A_{ciągł}T_{próbkowania}}$), skoro były już obliczone macierze układu ciągłego? Jaki był czas próbkowania? Ten etap projektowania wymaga dokładniejszego opisu.
6. Wiele wyników (np. wnioski rys. 4.16) opiera się na zdjętych eksperymentalnie charakterystykach częstotliwościowych. Przydałoby się wyjaśnienie w jaki sposób były one zdejmowane i czy uwzględniano przy tym zawartość wyższych harmonicznych w sygnale wyjściowym.
7. Ciekawe byłoby porównanie właściwości śledzących układów (przy różnych, zmiennych trajektoriach napięcia zadanego. Bardzo interesujące byłoby porównanie pracy zaproponowanego układu z możliwościami komercyjnych przekształtników.

Myszę, że byłoby najwygodniej, gdyby Autor przedstawił komentarz do tych, lub jakichkolwiek innych, uwag na piśmie, mam nadzieję, że niektóre z nich będą przyczynkiem do ciekawej dyskusji w trakcie publicznej obrony.

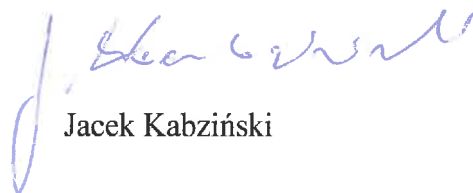
4. Konkluzja

Ogólna ocena rozprawy i przedstawionego w niej toku dociekań naukowych jest bardzo pozytywna. Praca jest ciekawa i wartościowa, odnosi się do problemów bardzo aktualnych w sterowaniu i do istotnych zastosowań. Autor przedstawił jasną analizę problemu, podstawy teoretyczne, badania symulacyjne i badania eksperymentalne na stanowisku laboratoryjnym. Wykazał się przy tym dużym zasobem wiedzy z zakresu układów energoelektronicznych, teorii sterowania, informatycznych technik symulacji i przetwarzania danych pomiarowych, udowodnił zdolności umożliwiające praktyczne uruchomienie nowoczesnego stanowiska laboratoryjnego. W pełni zgadzam się ze stwierdzeniem p. Tomasza Dziwińskiego (str. 111):

„Najbardziej znaczącym wynikiem pracy jest realizacja złożonych i zaawansowanych systemów sterowania obejmujących sprzęt i oprogramowanie.

W pracy określono poprawnie zagadnienie naukowe, rozwiązano je samodzielnie, przy użyciu właściwych metod, uzyskano nowe wyniki merytoryczne. Autor wykazał się właściwą wiedzą, umiejętnością przedstawienia wyników, umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Praca nie wymaga uzupełnień.

Rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i w świetle obowiązujących przepisów może być dopuszczona do publicznej obrony.



Jacek Kabziński