

Dr hab. inż. Jacek Rąbkowski

Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny

Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej

Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I INFORMATYKI POLITECHNIKI KOSZALIŃSKIEJ

Tytuł rozprawy:

Modelowanie i badania wybranych impulsowych przetwornic napięcia stałego, pracujących w trybie nieciągłego przewodzenia (DCM).

Autor rozprawy: **mgr inż. Marcin Walczak**

1. Wstęp. Tematyka rozprawy.

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Walczaka poświęcona jest zagadnieniom związanym z modelowaniem i badaniami przekształtników (przetwornic) napięcia stałego pracujących w trybie nieciągłego przewodzenia a w szczególności problematyce parametrów pasożytniczych elementów wchodzących w skład ich obwodów mocy. Autor rozprawy skupił się na podstawowych topologiach – w tym przede wszystkim przekształtniku napięcia stałego o charakterystyce obniżającej (BUCK), pracującego z częstotliwością przełączania 100 kHz, przy czym z podawanych w treści pracy parametrów zasilania i obciążenia wynika, że jest to układy małej mocy. O ile zagadnienia wpływu parametrów pasożytniczych półprzewodnikowych elementów mocy oraz elementów biernych, przede wszystkim ich rezystancji, są dla klasycznych układów pracujących w trybie ciągłego przewodzenia (CCM) dosyć dobrze rozpoznane w literaturze to tematyka związana z układami pracującymi w trybie nieciągłego przewodzenia (DCM) jest zbadana znacznie słabiej. Tymczasem układy takie są powszechnie wykorzystywane w szeregu aplikacji, począwszy od układów prostowników o poprawionym współczynniku mocy (PFC) po rozwiązania związane z przekształcaniem energii z paneli fotowoltaicznych, z uwagi na ograniczone straty mocy przełączania. Co więcej, wraz z pojawieniem się w obszarze średnich mocy tranzystorów MOSFET z węgla krzemu, charakteryzujących się dużymi stratami energii w czasie załączenia w stosunku do strat energii

w trakcie wyłączenia, rola układów wykorzystujących tryb DCM będzie się zwiększać. Stąd wynika konieczność prowadzenia prac badawczych pozwalających na lepsze zrozumienie i modelowanie tego typu układów. Wypełnienie luki merytorycznej w obecnym stanie wiedzy w tym zakresie należy uznać za istotną i uzasadnioną motywację podjęcia tematu rozprawy. Uważam, że, tematyka rozprawy jest aktualna i dostatecznie ważna.

Postawiony przez autora rozprawy problem naukowy – opis przekształtników napięcia stałego pracujących w trybie DCM poprzez modele małosygnałowe, który uwzględniały by parametry pasożytnicze elementów, na pierwszy rzut oka może wydawać się nieco zbyt szeroki. Po uważnej lekturze pracy uważam jednak, że został on trafnie i jasno sformułowany. Autor systematycznie rozpatruje nie tylko „typowe” parametry pasożytnicze elementów, ale także zmiany indukcyjności dławików w funkcji prądu a więc stara się prześledzić różnego rodzaju niedoskonałości obwodu mocy przekształtników napięcia stałego.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Licząca 99 stron rozprawa składa się z 6 rozdziałów, bibliografii oraz 6 dodatków zawierających wybrane elementy takie, jak na przykład wyprowadzenia uśrednionych modeli małosygnałowych.

Rozdział pierwszy – zawiera krótkie (3 str.) wprowadzenie, cel i zakres rozprawy. Autor wstępnie szkicuje stan wiedzy i motywację do podjęcia danej tematyki badawczej a następnie przedstawia cel rozprawy. Należy zaznaczyć, że autor nie zdecydował się na postawienie tezy, którą chciałby udowodniać. W dalszej kolejności omawia cele cząstkowe i zakres rozprawy.

Rozdział drugi zawiera podstawowe informacje o przekształtnikach napięcia stałego tzn. autor bardzo skrótowo omawia podstawowe topologie układów, metody sterowania a także tryby pracy takich układów. Na koniec przedstawione są wybrane zastosowania: zasilanie odbiorników napięciem stałym, prostowniki o poprawionym współczynniku mocy oraz układy współpracujące z panelami fotowoltaicznymi. Co prawda wszystkie niezbędne informacje z powołaniem się na źródła autor w tym rozdziale dostarcza, ale trudno oprzeć się wrażeniu, że omawiane tematy są potraktowane trochę pobieżnie. W trakcie omawiania trybów pracy zapewne nie zaszkodziłyby odpowiednie równania wskazujące warunki graniczne, z kolei w podrozdziałach o zastosowaniach przedstawione przebiegi czasowe wymagają ilustracji schematami.

W kolejnym rozdziale autor także bardzo skrótowo omawia wybrane sposoby modelowania przekształtników napięcia stałego: metody tworzenia modeli uśrednionych, linearyzację, tworzenie transmitancji małosygnałowych. W zasadzie można tu powtórzyć komentarz do rozdziału drugiego, trudno zarzucić brak podstawowych informacji ale rozdział sprawia wrażenie poszerzonego przeglądu literatury.

Rozdział czwarty omawia wybrane metody wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych przekształtników napięcia stałego. Widać wyraźnie, że autor dobrze zna tę tematykę i swobodnie się po niej porusza, co więcej, opisuje w tym rozdziale własne doświadczenia zabrane w trakcie prac badawczych. Znaleźć można tu opis metod z filtracją, z wykorzystaniem analizy Fouriera oraz z wymuszaniem odpowiedzi na skok jednostkowy. W zasadzie jedynym zastrzeżeniem, które można zgłosić do rozdziału 4 rozprawy jest brak jasnego podsumowania. Dopiero w dalszej części rozprawy autor wskazuje metodę, po którą warto sięgnąć.

Rozdział piąty to zasadnicza część rozprawy dotycząca wpływu parametrów pasożytniczych elementów aktywnych i pasywnych na charakterystyki przetwornic napięcia stałego, przy czym autor omawia wyłącznie przypadek przetwornicy obniżającej napięcie. Po wstępie zawierającym ponowne wprowadzenie do tematyki z licznymi odwołaniami do literatury autor podejmuje temat wpływu oscylacji prądu dławika, które mają miejsce po wyłączeniu tranzystora i diody, na charakterystyki częstotliwościowe układu. Wydaje się, że tytuł podrozdziału „Pojemności pasożytnicze diody i tranzystora” jest lekko mylący, choć zawiera istotną część osiągnięć autora. Omawiany wpływ okazuje się być istotny, co jest wykazane na przykładzie dwóch zestawów eksperymentalnie wyznaczonych charakterystyk. W dalszej części rozdziału 5 autor zajmuje się wpływem szeregowych rezystancji elementów, przede wszystkim rezystancji kondensatora wyjściowego podejmując wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych dla trzech różnych zestawów parametrów przekształtnika obniżającego napięcie. Wykonane zostały zarówno symulacje komputerowe, jak i prace eksperymentalne, które prowadzą do bardzo interesujących wniosków. Następnie poruszone jest zagadnienie wpływu zmiany indukcyjności dławika zachodzące pod wpływem płynącego prądu. Autor w bardzo interesującym ciągu badań wykazuje wpływ tego zjawiska na charakterystyki przekształtnika obniżającego napięcie. Wątpliwości budzi tu jedynie analizowanie problemu dla przypadku pracy z ciągłym prądem dławika, co nie do końca odnosi się do tematu i zakresu pracy. W dalszej kolejności bardzo lakoniczne odniesienie się do problemu indukcyjności wewnętrznej kondensatora bazujące na przeglądzie literatury – podrozdział ten w zasadzie mógłby być pominięty, ale wydaje się być zapowiedzią dalszych prac badawczych. Rozdział piąty kończy syntetyczne podsumowanie.

Zasadniczą część pracy kończy rozdział 6 zawierający syntetycznie zestawione na dwóch stronach wnioski, w których autor podsumowuje swoją pracę i wskazuje kierunki dalszych badań.

Spis literatury obejmuje 142 pozycje - w większości przypadków są to publikacje w czasopiśmie lub konferencyjne w języku angielskim, choć autor odwołuje się także do podręczników. Dobór literatury, jak i miejsca odwołań do niej należy uznać za prawidłowe, co więcej świadczy o doskonałej znajomości literatury przedmiotu. Spis literatury jest uzupełniony wykazem 10 publikacji, których autorem lub współautorem jest mgr inż. Marcin Walczak, z czego istotną część stanowią czasopisma krajowe wydawane w języku angielskim.

Ponadto w pracy umieszczono 6 załączników zawierających schematy, przykłady wyprowadzeń modeli przekształtników napięcia stałego, pełne wyniki pomiarów oraz zestaw transmitancji małosygnałowych wybranych układów.

Układ redakcyjny pracy jest prawidłowy, w mojej ocenie sekwencja prezentowanej tematyki jest poprawna. Używane nazewnictwo jest właściwe, pracę napisana jest w sposób jasny i czytelny. Szata graficzna jest na dobrym poziomie, rysunki są w większości czytelne i poprawnie opisane. Oczywiście autor nie ustrzegł się szeregu niedociągnięć redakcyjnych i formalnych, które zestawione są w punkcie 3 tej recenzji. Z tego punktu widzenia z całości pracy wyróżnia się bardzo dobrze dopracowany kluczowy rozdział 5, natomiast rozdziały wstępne wypadają nieco gorzej. Niestety, czasami autor jest w swych wywodach zbyt lakoniczny, pomija kluczowe schematy, parametry czy objaśnienia.

3. Uwagi ogólne

W czasie studiowania rozprawy nasunęły mi się następujące **uwagi dyskusyjne natury ogólnej**:

1. W rozprawie brakuje jasnego określenia przeznaczenia i zakresu mocy przekształtników napięcia stałego, którymi zajmuje się autor. Proszę o doprecyzowanie.
2. Nawiązując do pierwszej uwagi – w większości przypadków (pomijając układ na str. 32) analizowane układy pracują z częstotliwością 100 kHz. Biorąc pod uwagę niskie napięcie wejściowe, małe moce oraz pracę w trybie nieciągłego przewodzenia wydaje się być to wartość dosyć niska. Proszę o uzasadnienie wyboru takiej wartości częstotliwości przełączeń.
3. Kolejna uwaga także dotyczy doboru parametrów obwodu a konkretnie pojemności kondensatora wyjściowego przekształtnika obniżającego napięcie. Wartość jest o tyle istotna, że zgodnie z tym, co autor przedstawia w rozdziale 5, ma istotny wpływ na charakterystyki częstotliwościowe. Analizowane wartości pojemności leżą w bardzo szerokim zakresie od 1,1 do 330 μF , przy czym autor odwołuje się na stronie 49 do literatury wskazując zakres 4,7 do 10 μF . Proszę o jasne wskazanie zastosowanych kryteriów doboru tego kondensatora.
4. W podrozdziale 5.2 autor porównuje zachowanie się przetwornicy bez i z układem snubbera nie podając nawet parametrów zastosowanego obwodu RC, odsyłając do źródeł literaturowych. Proszę o doprecyzowanie tych parametrów i krótkie omówienie sposobu ich doboru.
5. Zastosowanie obwodu RC ograniczyło oscylacje ale przebieg prądu na rys. 5.8 wskazuje, że nie wyeliminowało ich w całości. Czy można się spodziewać, że przy odpowiednio dużym współczynniku wypełnienia impulsu problem może ponownie wystąpić ?
6. Odnosząc się ponownie do podrozdziału 5.2, w którym wykazano wpływ oscylacji prądu dławika na rzeczywisty współczynnik wypełnienia w układzie pracującym w otwartej pętli sterowania poproszę o komentarz do co do możliwego wpływu wspomnianego zjawiska na układ pracujący w pętli zamkniętej.
7. W tabeli 5.3 na str. 50 dla przetwornicy pojawia się „dodatkowy rezystor 90 m Ω ”, ale autor nie do końca objaśnia gdzie i w jakim celu go zastosował. Czy jest to rezystor szeregowy ?
8. W trakcie rozważań nad wpływem zmian indukcyjności dławika w funkcji prądu zawartych w podrozdziale 5.4 autor przechodzi do rozpatrywania przekształtnika napięcia stałego pracującego w trybie ciągłym, co uzasadnione jest koniecznością uzyskania większych prądów (s. 68). Uzasadnienie to jest nie do końca wiarygodne bo już na s. 70 autor stwierdza, że wpływ ten ujawnia się „nawet dla prądów stanowiących ułamek maksymalnego prądu określonego przez producenta”. Dlatego w mojej ocenie przedstawione wnioski lokują się poza obszarem pracy – obejmującym przecież układy z nieciągłym przewodzeniem i dlatego nasuwa się pytanie czy podobny wpływ można by zaobserwować dla takich właśnie układów ?
9. W kilku miejscach pracy pojawia się oscylogram przedstawiający przebieg prądu dławika ale brakuje opisu sposobu jego pomiaru, który w mojej ocenie jest dosyć istotny. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.

4. Uwagi szczegółowe

W tabeli poniżej podano najbardziej znaczące pomyłki edycyjne i formalne. Poniższe uwagi szczegółowe nie mają istotniejszego wpływu na ocenę merytorycznej wartości pracy i na ogół nie utrudniają odbioru zawartych w niej treści.

Nr strony	Linia	Uwagi
7	18	control-to-output – kursywa lub cudzość
7	24/25	„dynamika charakterystyk częstotliwościowych” – sformułowanie nie do końca zrozumiałe
7-8	-	Objaśnianie skrótu DCM powinno nastąpić przy pierwszym użyciu – można też pominąć bo jest na str. 6
10	5/6	Wydaje się być odwrotnie niż napisał Autor – mnogość zastosowań spowodowała pojawienie się dużej liczby topologii.
10	11	Powinno być raczej „...sterowane przy pomocy modulacji szerokości impulsów”
12	7	Słowo „użytkownik” nie jest tu chyba właściwe.
12	23	Stwierdzenie o nieprzekraczaniu zakresu temperatury od 80 do 120°C jest dosyć dyskusyjne
13	9	Powinno być „Zaletą metody PWM ..”
13	15	Filtry mogą być także na wejściu.
16	ostatnia	Nie do końca widzę związek z zasilaniem z baterii
18	15	Przetwornice dc/dc w układach UPS są zwykle jednokierunkowe.
18	24/25	Niefortunne powtórzenie „układy niskonapięciowe”
19	10	Stwierdzenie o przesunięciu fazowym między napięciem wejściowym a wartością średnią prądu jest dosyć kontrowersyjne, chodzi o przesunięcie między pierwszą harmoniczną napięcia wejściowego i prądu pobieranego przez prostownik
19	13	Nie ma takiego pojęcia jak „korektor PFC” – są prostowniki o poprawionym współczynniku mocy
20	14	Dlaczego z dużej litery ?
21	1	Chyba „cykliczną pracę tranzystorów w przetwornicach”
21	3.1	Czytelnik trochę domyśla się, że T to okres przełączania
22	9	Co to jest „faza przetwornicy” ?
22	przedostatnia	Sformułowanie „mało przyjazne” jest dosyć mgliste

23	2	Powinno być : „...w roku 1990”
24	3.18/3.19	Równania w tabeli ?
26	3.6	Czy kierunek źródła prądu I_0 jest poprawny ?
31	3	Brakuje chyba „takich jak:”
36	4.11	Raczej „sposób postępowania”
39	15	Stwierdzenie „wpływ indukcyjności pasożytniczych kondensatorów” można inaczej zrozumieć
39	20/21	Powinno być „oraz napięcia na zaciskach”
43	5.5./5.6	Rysunki są przywoływane w tekście w odwrotnej kolejności, trudno czytelne skale na oscylogramach
46	Ostatnie zdanie	Nie do końca zrozumiałe.
48	5.2	Brak opisu oznaczeń utrudnia zrozumienie podanych zależności
52	6/7	Stwierdzenie „znajduje się poza słuszością” jest dosyć niefortunne
54/57	5.14/5.15	Dopisek o szczegółowym opisie w tekście jest chyba niepotrzebny
59	5.16	Duża litera w podpisie rysunku
60	26	Powinno być „pracującą w trybie DCM”
62	17	Chyba by lepiej wyglądało $10\text{ m}\Omega$
70	5.27	Rysunek mógłby być trochę większy
71	31	Raczej „elementów półprzewodnikowych” niż „łączników”
73	1-3	Powtórzenie słowa „cel” w dwóch pierwszych zdaniach źle wygląda
74	2	Powinno być „na kształt charakterystyk ...”
98-99	-	Brak opisu oznaczeń w równaniach.

5. Ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska zawiera części analityczną, symulacyjną i przede wszystkim eksperymentalną, stanowiące oryginalny dorobek autora, który mimo wymienionych uwag należy ocenić pozytywnie. Autor postawił cele pracy, które w mojej ocenie zostały zrealizowane. Przedstawione wyniki symulacji i eksperymentów stanowią istotne poszerzenie wiedzy w obszarze modelowania przekształtników napięcia stałego pracujących w trybie nieciągłym. Wyniki tych badań należy uznać za istotne.

Zakres wykorzystanej literatury jest bardzo bogaty i nie ogranicza się tylko do jej przeglądu w rozdziałach wstępnych. Za zdecydowaną zaletę rozprawy należy uznać, że autor swoje rozważania zawsze umiejscawia w kontekście stanu wiedzy w z dyscypliny naukowej, którą się zajmuje. Świadczy to o dużej wiedzy i znajomości literatury: podręczników, prac drukowanych w czasopiśmie i na konferencjach a także not katalogowych i aplikacyjnych. Autor wykazał się dobrą znajomością elektroniki, metod symulacji obwodów elektronicznych, technik pomiarowych oraz metod prowadzenia badań eksperymentalnych obejmujących pomiary charakterystyk częstotliwościowych przekształtników napięcia stałego małej mocy.

Za oryginalny dorobek autora uznaje:

- wykonanie szeregu analiz i porównań wskazujących właściwości różnych modeli małosygnałowych przekształtników napięcia stałego
- wyprowadzenie modelu dwubiegunowego uwzględniającego rezystancję pasożytniczą kondensatora wyjściowego oraz jego weryfikację symulacyjną i eksperymentalną,
- zidentyfikowanie wpływu oscylacji prądu dławika na charakterystyki częstotliwościowe przekształtnika obniżającego napięcie
- dokonanie szczegółowych analiz symulacyjnych i eksperymentalnych wpływu parametrów pasożytniczych na charakterystyki częstotliwościowe przekształtnika napięcia stałego, ze szczególnym uwzględnieniem rezystancji szeregowej kondensatora wyjściowego.

Wszystkie wymienione wyżej osiągnięcia mają bardzo duże znaczenie poznawcze w obszarze przekształtników napięcia stałego pracujących w trybie nieciągłego przewodzenia. Z pewnością można by w nich także dopatrzeć się przydatności praktycznej, jednak autor nie uwzględnił tych aspektów w rozprawie.

Do wad i słabych stron rozprawy zaliczam dosyć pobieżne wprowadzenie do tematyki, momentami niezbyt systematyczne przedstawianie poszczególnych zagadnień, ale przede wszystkim brak odniesienia do konkretnych zastosowań a przez to dosyć dowolny dobór parametrów omawianych układów.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa przedstawiona przez mgr inż. Marcina Walczaka pt. **„Modelowanie i badania wybranych impulsowych przetwornic napięcia stałego, pracujących w trybie nieciągłego przewodzenia (DCM)”** stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje wysoki poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej z zakresu dziedziny Elektronika, a także na umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez autora.

Na tej podstawie stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania sformułowane w odniesieniu do rozpraw doktorskich w obowiązującej aktualnie ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i może być dopuszczona do publicznej obrony.