

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 ELEKTRYCZNEGO POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ

Tytuł rozprawy:

Nieizolowane quasi-rezonansowe przekształtniki podwyższające napięcie z dławikami dzielonymi

Autor rozprawy: **mgr inż. Michał Harasimczuk**

1. Wstęp. Tematyka rozprawy.

Praca doktorska mgr inż. Michała Harasimczuka poświęcona jest bezpośrednim przekształtnikom napięcia stałego z o charakterystyce podwyższającej, w szczególności układom quasi-rezonansowym wykorzystującym dławiki dzielone. W świetle intensywnego rozwoju energoelektroniki w zastosowaniach takich, jak sprzęganie odnawialnych źródeł energii z siecią elektroenergetyczną czy łączenie źródeł niskonapięciowych z obwodami wysokonapięciowymi w obszarze elektromobilności jest to tematyka istotna i w pełni wpisuje się w aktualne światowe trendy badań. Obok szerokiego spektrum ośrodków zagranicznych aktywnych w tej tematyce należy odnotować prace w podobnych obszarach w szeregu krajowych ośrodków badawczych, by wymienić tylko prace prowadzone na Politechnice Gdańskiej, Śląskiej, Akademii Górniczo-Hutniczej, Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym, Politechnice Warszawskiej czy wreszcie przez grupę badaczy z Politechniki Białostockiej, z której wywodzi się autor.

W świetle widocznego niedoboru w literaturze przekształtników energoelektronicznych, które wykorzystują dodatkowe obwody w celu uzyskania miękkiej komutacji łączników mocy (układy quasi-rezonansowe) i jednocześnie dławiki dzielone w celu uzyskania dużego wzmocnienia napięciowego autor postawił sobie za cel opracowanie i przebadanie tego typu układów. Wypełnienie luki merytorycznej w obecnym stanie wiedzy w tym zakresie należy uznać za istotną i uzasadnioną motywację podjęcia tematu. W mojej ocenie cel i teza rozprawy są jednoznaczne a oryginalność tematyki polega na zaproponowaniu i przebadaniu nowych, usprawnionych topologii przekształtników energoelektronicznych.

Zastosowana metodyka badań, obejmująca rozważania i analizy teoretyczne, badania symulacyjne, ale przede wszystkim weryfikację eksperymentalną, świadczy o pełnej dojrzałości autora jako badacza – energoelektronika.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Licząca 115 stron rozprawa składa się z części wstępnej (pominiętej w numeracji rozdziałów), czterech rozdziałów, podsumowania, bibliografii oraz dwóch dodatków obejmujących schematy oraz opis stanowiska badawczego i zestawienia wykorzystywanej aparatury.

Po krótkim 3-stronicowym wprowadzeniu do tematyki rozprawy następuje rozdział pierwszy pt. „Ocena stanu badań i osiągnięć naukowych” zawierający właściwe wprowadzenie merytoryczne. Autor zdecydował się na dosyć nietypowy układ redakcyjny tzn. zamiast przeglądu literatury zaproponował autorskie omówienie istotnych z punktu widzenia rozprawy topologii przekształtników energoelektronicznych sporadycznie ilustrowane odniesieniami do literatury przedmiotu. I tak, w podrozdziale 1.1. omawia zasadę działania i podaje podstawowe zależności opisujące trzy topologie przekształtników napięcia stałego oraz podejmuje próbę porównania ich wybranych właściwości by przejść do modeli dławika dzielonego i w podrozdziale 1.3 omówić przekształtniki quasi-rezonansowe a w 1.4 przekształtniki z dławikami sprzężonymi. O ile pierwsze podrozdziały zawierają wiedzę podstawową, książkową i w dużej mierze znaną już od lat ponad 30, to w 1.3 i 1.4 doktorant sięga po literaturę aktualną, nie starszą niż kilka lat. Przedstawia szereg topologii układowych i opatrzone komentarzem ich zestawienie, które prowadzi do wniosku, że omawiane układy cechuje ograniczona moc znamionowa oraz relatywnie niska sprawność. To, po krótkim przeglądzie zastosowań takich układów w podrozdziale 1.5, prowadzi do sformułowania w podrozdziale 1.6 tezy:

W nieizolowanych quasi-rezonansowych przekształtnikach DC/DC podwyższających napięcie z dławikami dzielonymi możliwe jest osiągnięcie:

- *wysokiej sprawności energetycznej*
- *wymaganego współczynnika transformacji napięcia stałego*
- *pracy przy wysokiej częstotliwości łączeń*

oraz celu i zakresu pracy do tej tezy nawiązujących. Teza rozprawy została sformułowana poprawnie, przy czym, w mojej ocenie, zabrakło tu dokładniejszego sprecyzowania parametrów np. zdefiniowania co rozumie się przez wysoką sprawność energetyczną. Należy pamiętać, że, w zależności od kategorii urządzeń energoelektronicznych, pod pojęciem tym mogą się kryć zupełnie inne zakresy sprawności. Podobna uwaga dotyczy sformułowania o wysokiej częstotliwości łączeń.

Lektura rozdziału pierwszego, przede wszystkim podrozdziałów 1.1 i 1.2, dostarcza szeregu podstawowych informacji dotyczących omawianej tematyki, co jest zdecydowaną zaletą z punktu widzenia czytelnika nieorientowanego. Natomiast czytelnik bardziej zaawansowany zapewne skupi się na podrozdziałach 1.3 i 1.4, które z kolei wydają się chwilami zbyt pobieżne – autor przedstawia sporą ilość topologii układowych ograniczając się do dosyć lakonicznych komentarzy. Ich zestawienia i porównania w tabelach 1.3 i 1.4 są także dosyć lakonicznie omówione. Niemniej jednak, rozdział pierwszy wskazuje na dużą wiedzę i znajomość literatury w zakresie dotyczącym tematyki rozprawy. Co ważne, rozdział napisany jest jasnym, precyzyjnym językiem bez większych problemów z terminologią, nie spotyka się także znaczących wpadek językowych.

Kolejny rozdział dotyczy quasi-rezonansowych przekształtników podwyższających napięcie z dławikami dzielonymi, które pracują z przełączaniem przy zerowym prądzie. Autor zajmuje się dwiema topologiami układowymi – przekształtnikiem pracujący przy stałym czasie załączenia tranzystora oraz własną propozycję przekształtnika, który dzięki dodatkowemu tranzystorowi zyskuje możliwość pracy przy wykorzystaniu modulacji szerokości impulsów. Zasada działania pierwszego układu zostaje dokładnie omówiona w podrozdziale 2.1, gdzie można znaleźć też opisujące go kluczowe zależności oraz charakterystyki a także sekcję dotyczącą doboru elementów obwodu rezonansowego. Niestety, oprócz wybranych, teoretycznych przebiegów na rys. 2.1, brak jest w pracy analizy symulacyjnej omawianego układu, która pozwoliłaby lepiej przedstawić jego cechy poprzez analizę przebiegów wartości chwilowych. Jest to brak dosyć odczuwalny, ponieważ modyfikację układu, omawianą w podrozdziale 2.2, autor motywuje właśnie wadami przekształtnika omawianego wcześniej – w tej sytuacji wypada uwierzyć mu na słowo. W podobnej konwencji tzn. precyzyjnego opisu zasady działania ilustrowanego przebiegami teoretycznymi i wzbogaconego szeregiem zależności utrzymany jest podrozdział 2.2. W tym przypadku, obok sekcji dotyczącej zasad doboru obwodu elementów obwodu rezonansowego, pojawia się analiza pracy układu przy prądzie ciągłym oraz na granicy ciągłości prądu dławika. Co więcej, autor przedstawia też – skromne, bo zawarte na jednym rysunku, wyniki badań symulacyjnych, które posłużyły tu do potwierdzenia poprawności zasady działania zaproponowanego przekształtnika. W dalszej części przechodzi do projektu modelu laboratoryjnego, gdzie przedstawia projekt dławika dzielonego oraz dobór pozostałych elementów układu na bazie przedstawionych wcześniej zależności analitycznych. Wreszcie, przedstawia wyniki eksperymentów – wybrane oscylogramy oraz charakterystyki, które pokazują, że zaproponowany przekształtnik działał poprawnie w warunkach miękkiego przełączania przy dużym wzmocnieniu napięcia i mocy nawet do 1,2 kW. Niestety, oprócz przedstawienia charakterystyk sprawności oraz rezystancji w funkcji częstotliwości przełączeń, autor nie zdobył się na bardziej dogłębne przedstawienie właściwości zaproponowanego układu. Warto by dodać informacje na temat jakości przebiegów wartości chwilowych prądów i napięć na wejściu oraz wyjściu układu. Zależność (2.55) oraz widoczny na rysunku 2.9.a przebieg prądu wejściowego sugeruje dosyć duży poziom tętnień, a brak jest dokładniejszych informacji na ten temat (np. o współczynniku tętnień). Podsumowując, w rozdziale drugim autor przedstawia w sposób bardzo solidny dwie topologie przekształtników quasi-rezonansowych z dławikami dzielonymi, jedna z nich jest propozycją autorską, i o ile do części teoretycznych trudno mieć zastrzeżenia to część symulacyjna czy eksperymentalna mogły by być poszerzone. Niemniej jednak zaprezentowane wyniki mogą być uznane za wystarczające do udowodnienia postawionej w pracy tezy.

Rozdział 3 ma strukturę zbliżoną do omówionego wcześniej rozdziału 2, tzn. omówione są dwie topologie quasi-rezonansowych przekształtników napięcia stałego dławikiem dzielonym i przełączaniem tranzystora głównego przy zerowym napięciu. Pierwszy układ z jednym tranzystorem i stałym czasem jego wyłączenia jest niejako punktem odniesienia do którego autor odnosi omawiając układ dwutranzystorowy, który może pracować z modulacją szerokości impulsów. W podrozdziale 3.1 znaleźć można precyzyjny opis pierwszego z układów, włączając w to analizę obwodu w różnych przedziałach czasu, szereg zależności, w tym na współczynnik wzmocnienia, oraz charakterystyk pokazujących podstawowe właściwości. Wydaje się, że najistotniejsza jest tu $ch-ka$ na rys. 3.3 wskazująca na znaczną zmianę napięcia na tranzystorze w funkcji częstotliwości względnej, co jest zdecydowanie wadą omawianego układu. Szkoda, że autor nie pokusił się tu o lepsze naświetlenie tego problemu np. poprzez pokazanie jak rosnące wymagane napięcie blokowania tranzystora i diody wpływa na straty przewodzenia w układzie. Z drugiej strony autor przedstawia interesujące wyniki badań eksperymentalnych modelu o mocy 100 W. Pomija przy tym badania symulacyjne i opis modelu eksperymentalnego, który przedstawiony jest jednak w dalszej

części pracy. Charakterystyki sprawności i jeden oscylogram w zasadzie pokazują, że układ działa, ale jest bardzo czuły na zmianę parametrów.

W odpowiedzi na niezadawalające właściwości układu podstawowego autor proponuje układ dwutranzystorowy, który, podobnie jak w rozdziale 2, daje większe pole manewru w doborze długości przedziałów czasowych i umożliwia pracę z modulacją szerokości impulsów. Co więcej, po przestudiowaniu zasady działania i podstawowych charakterystyk, czytelnik dociera do bardzo interesującej części omawiającej pracę przekształtnika w różnych trybach. Okazuje się, że przechodzenie między trybami umożliwia istotne zmiany rezystancji obciążenia bez przekraczania maksymalnego napięcia dren-źródło, co eliminuje wspomnianą powyżej wadę układu podstawowego. Po omówieniu budowy modelu laboratoryjnego o mocy 300 W, ponownie z pominięciem badań symulacyjnych, przedstawione są wyniki badań laboratoryjnych. I znowu oscylogramy oraz charakterystyki sprawności w zasadzie pokazują podstawowe właściwości np. możliwość pracy w szerokim zakresie częstotliwości i różnych trybach bez przekraczania maksymalnego napięcia dren-źródło ale można by tu pokazać znacznie więcej. Zdecydowanie brakuje przebiegów prądów i napięć na kluczowych elementach obwodu, co wobec braku wyników symulacji, każe stawiać pytanie o zgodność uzyskanych wyników z analizą teoretyczną. Podsumowując zawartość 22-stronicowego rozdziału numer trzy należy stwierdzić, że pomimo szeregu uwag do jego zawartości oraz drobnych błędów formalnych i stylistycznych, autor udowadnia postawioną w pracy tezę, tym razem przy pomocy układu z przełączaniem przy zerze napięcia o mocy 300 W.

Rozdział czwarty omawia quasi-rezonansowy przekształtnik podwyższający napięcie z dławikiem dzielonym i przełączanym kondensatorem. Topologia znana jest w literaturze, natomiast autor proponuje zmodyfikowany tryb pracy, który skutkuje uzyskaniem wyłączania tranzystora przy zerowym napięciu. Analogicznie jak w poprzednich częściach rozprawy znaleźć można tu szczegółowe omówienie zasady działania układu wsparte szeregiem zależności i charakterystyk. Omówione są też zagadnienia zakresu miękkiego przełączania elementów oraz dosyć istotna kwestia napięć na elementach półprzewodnikowych. W tym rozdziale nie przedstawiono wyników badań symulacyjnych a po sekcji omawiającej projektowanie modelu o mocy 300W przedstawione są wyniki badań laboratoryjnych przekształtnika. Przy czym autor ogranicza się do przedstawienia kilku wybranych oscylogramów pokazujących napięcia na kluczowych elementach półprzewodnikowych oraz charakterystyk sprawności w funkcji mocy układu. Ponownie końcówka rozdziału pozostawia pewien niedosyt, choć należy podkreślić, że 13-stronicowy rozdział jest napisany w dobrym stylu i, przede wszystkim, można uznać że autor ponownie udowadnia tezę rozprawy – osiągnięta szczytowa sprawność energetyczna przekształtnika sięga 95,5 %.

Pracę kończy krótki rozdział zawierający podsumowanie pracy, bardzo interesujące porównanie pięciu badanych topologii układowych oraz zestawienie osiągnięć autora.

Oprócz części zasadniczej rozprawa zawiera dwa dodatki, bibliografię i angielskie streszczenie pracy. Dodatki zawierają schematy ideowe oraz obwodów drukowanych dwóch przekształtników a także zestawienie literatury i opis stanowiska badawczego wraz z układem sterującym. Literatura, na którą składa się 68 pozycji, zawiera przede wszystkim publikacje naukowych w czasopismach międzynarodowych, z czego w 10 przypadkach są to publikacje lub patenty autora rozprawy.

Strona redakcyjna pracy stoi na bardzo wysokim poziomie. Oczywiście zdarzają się autorowi drobne błędy, które zestawilem w punkcie 4 tej recenzji, ale na ogół używana terminologia jest właściwa a styl bardzo dobry. Chronologia prezentowanej tematyki jest

poprawna a treść rozdziałów odpowiada ich tytułom. Rysunki oraz tabele są czytelne i przejrzyste co ułatwia ocenę uzyskanych wyników symulacyjnych i eksperymentalnych.

3. Uwagi ogólne

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

1. Rysunek 1.5 pokazuje zestawienie charakterystyk sprawności dla trzech rodzajów przekształtników podwyższających, które powstało na bazie równań (1.11), (1.21) oraz (1.32). Ponieważ wspomniane zależności uwzględniają tylko straty przewodzenia poproszę o podanie warunków, po których spełnieniu faktycznie można mówić tu o sprawności energetycznej.
2. Ponieważ stwierdzenia o dużych stratach przewodzenia „w tranzystorze oraz elementach rezonansowych” (str. 48) nie zostały podparte w pracy przykładem analitycznym bądź symulacyjnym proszę o porównanie tych wartości dla układów z podrozdziałów 2.1 i 2.2 w wybranym punkcie pracy.
3. Przedstawione na rys. 2.9e i 2.9.f przebiegi napięć dren-źródło tranzystorów T1 i T2 wykazują znaczne oscylacje o częstotliwości powyżej 5 MHz a zjawisko to nie zostało skomentowane w tekście. Proszę o wyjaśnienie mechanizmu tych oscylacji i ich wpływu na działanie przekształtnika.
4. Zaproponowany i omówiony w p. 3.2 quasi-rezonansowy przekształtnik z przełączaniem przy zerze napięcia zapewne został solidnie przebadany w laboratorium, jednak w pracy umieszczono tylko wybrane wyniki. Czy autor dysponuje przebiegami napięć i prądów obydwu tranzystorów, które potwierdzą deklarowane we wspomnianym rozdziale przełączanie elementów przy zerowych napięciach lub prądach ?
5. Przedstawione w podsumowaniu zestawienie wskazuje, że wśród badanych układów najkorzystniej pod względem sprawności energetycznej prezentują się omówione w podrozdziale 2.2 układ ZCS-PWM oraz przedstawiony w rozdziale 4 układ ZVS-SC, jednak ich bezpośrednie porównanie jest utrudnione ze względu na dużą różnicę w mocy znamionowej modeli laboratoryjnych. W związku z tym nasuwa się pytanie co by było, gdyby układ ZCS-PWM zaprojektować na moc 300W (i częstotliwość 200 kHz) lub odwrotnie, gdyby układ ZVS-SC pracował przy mocy 1,2 kW. Oczywiście nie proszę tu o wykonanie alternatywnych projektów ale przedstawienie dobrze uzasadnionych przypuszczeń.
6. Stwierdzenie na str. 102 „przekształtniki quasi-rezonansowe mogą stanowić konkurencję dla przekształtników klasycznych ponieważ oferują wyższą jakość przekształcania energii przy małych stratach oraz zwiększają niezawodność pracy urządzenia” w mojej ocenie zawiera aż dwa dosyć pochopne wnioski. Pomijając dosyć złożoną kwestię parametrów jakości energii chciałbym poprosić o rozwinięcie zagadnienia niezawodności – czy zważywszy na zwiększoną liczbę elementów składowych niezawodność może być w stosunku do układów klasycznych wręcz niższa ?

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 nie utrudniają odbioru treści.

Nr strony	Linia lub nr rysunku	Uwagi
9	22	„ogólnego tematycznego stanu wiedzy” - niezrozumiałe
19	Tab.1.1	Brak w tabeli napięcia i mocy na wyjściu
14,16,19		(1.11), (1.21) i (1.32) to ta sama zależność
25	16	Powinno być „prądzie”
39	4	Zdanie sformułowane niefortunnie, brzmi jakby autor chciał poprawiać cechy zjawisk fizycznych
41	5-7	Zdanie brzmi trochę jakby ktoś inny opracował owe topologie („zostały opracowane”) a autor je tylko przebadał
55	2.7	Chodzi zapewne o 400nH
63	26	Powinno być : „dławika”
66	3-5	Zdanie nie do końca jasno sformułowane
70		Zamiast „transpozycji” powinno być chyba „transformacji”
71	8-10	Pierwsze zdanie podrozdziału 3.2 nie jest do końca poprawnie sformułowane
71	13	Powinno być „jest ustalany poprzez wypełnienie”
73-74	3.32-3.36	Powtórzenie wzorów
76	5	Powinno być „rezystancji wyjściowej”
80	7	Chyba tab. 3.4 ?
85	31	Powinno być „ W przedziale tym ...”
86	5	Chodzi o diodę D _{C2} ?
96	19	Chyba chodzi o C4D06060A jak w tabeli.

5. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska zawiera bardzo mocną część analityczną, wybrane badania symulacyjne, ale przede wszystkim eksperymentalną weryfikację działania czterech typów przekształtników energoelektronicznych, które łączy charakterystyka podwyższająca, zastosowanie dławików dzielonych oraz quasi-rezonansowe działanie łączników mocy. Mimo wymienionych w punktach 3 i 4 uwag, rozprawę należy ocenić zdecydowanie pozytywnie. Autor sformułował tezę, którą udowodnił, w szczególności przeprowadzając badania symulacyjne i eksperymentalne quasi-rezonansowych przekształtników prądu stałego z dławikami dzielonymi o mocach znamionowych od 300 do 1200W. Zaproponowane rozwiązania, w szczególności układy opisane w podrozdziale 2.2 (ZCS-PWM) oraz rozdziale 4 (ZVS-SC), pracują poprawnie i wykazują bardzo dobre parametry energetyczne w odniesieniu do rozwiązań literaturowych. Wyniki tych badań należy uznać za istotne, co potwierdzają publikacje w czasopiśmie i na konferencjach krajowych oraz wskazane w rozprawie wnioski patentowe. Wnoszą one liczący się wkład w poszerzenie stanu wiedzy z zakresu topologii i projektowania quasi-rezonansowych przekształtników prądu stałego z dławikami dzielonymi. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością energoelektroniki i elektroniki a w szczególności metod analizy obwodów energoelektronicznych, metod projektowania elementów magnetycznych oraz prowadzenia badań eksperymentalnych w obszarze przekształtników napięcia stałego.

Za osiągnięcia własne autora uznaję:

- zaproponowanie oryginalnych topologii quasi-rezonansowych przekształtników prądu stałego z dławikami dzielonymi,
- opracowanie trzech modeli laboratoryjnych (w tym jednego w dwóch wersjach), w tym opracowanie elementów magnetycznych i obwodów mocy, cechujących się bardzo wysoką sprawnością energetyczną przy dużej przekładni napięciowej,
- przeprowadzenie cyklu eksperymentów z wykorzystaniem opracowanych układów,
- dokonanie porównania czterech badanych topologii przekształtników, w tym z rozwiązaniami znanymi z literatury.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa mgr inż. Michała Harasimczuka pt. „**Nieizolowane quasi-rezonansowe przekształtniki podwyższające napięcie z dławikami dzielonymi**” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wskazuje na wysoki poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej z zakresu energoelektroniki, a także na umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez autora.

Na tej podstawie stwierdzam, że przedstawiona praca 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 oraz, że może być dopuszczona do publicznej obrony.



