

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:

Izolowane przekształtniki podwyższające DC/DC zasilane z niskonapięciowych źródeł energii

Autor rozprawy: **mgr inż. Adam Krupa**

1. Wstęp. Tematyka rozprawy.

Rozprawa doktorska mgr inż. Adama Krupy poświęcona jest transformatorowym przekształtnikom napięcia stałego z wejściem o charakterze źródła prądu, które pracują przy dużym współczynniku wzmocnienia napięciowego i mocach powyżej 1 kW. W świetle dynamicznie rozwijających się obszarów zastosowań energoelektroniki takich, jak sprzęganie odnawialnych źródeł energii czy magazynów energii z siecią elektroenergetyczną jest to tematyka istotna i w pełni wpisuje się w aktualne światowe trendy badań. Obok szerokiego spektrum ośrodków światowych aktywnych w tym obszarze należy odnotować prace krajowych ośrodków badawczych, by wymienić tylko prace prowadzone na Politechnice Śląskiej, Akademii Górniczo-Hutniczej, Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym i Politechnice Poznańskiej czy wreszcie przez grupę badaczy z Politechniki Białostockiej, z której wywodzi się Autor. Grupa ta wykazywała aktywność w obszarze transformatorowych przekształtników prądu stałego, o czym świadczy szereg publikacji a recenzowana rozprawa jest kontynuacją tej tematyki w zakresie układów twaroprzelączających. W świetle niedoboru w literaturze przekształtników, które pracują z twardą komutacją, charakteryzują się jednocześnie wysoką przekładnią napięciową, mocą powyżej 1 kW i sprawnością przekraczającą 95% Autor postawił sobie za cel opracowanie i przebadanie układów, które takie warunki będą spełniały. W mojej ocenie cel i teza rozprawy są jednoznaczne a oryginalność tematyki polega na zaproponowaniu i przebadaniu nowych, zmodyfikowanych topologii przekształtników energoelektronicznych, w tym ze zintegrowanymi elementami magnetycznymi. Zastosowana metodyka badań, obejmująca pełny

cykl, w ramach którego zostały przeprowadzone rozważania i analizy teoretyczne, badania symulacyjne oraz weryfikacja eksperymentalna, świadczy o pełnej dojrzałości Autora jako badacza – energoelektronika. Wypełnienie luki merytorycznej w obecnym stanie wiedzy w tym zakresie należy uznać za istotną i uzasadnioną motywację podjęcia tematu. Należy podkreślić, że cel pracy jest aktualny i ważny z punktu widzenia wartości aplikacyjnych, jak i poznawczych – omawiane układy mogą współpracować z odnawialnymi źródłami energii, ale można sobie wyobrazić ich zastosowanie w pokładowych systemach zasilania różnych typów pojazdów elektrycznych.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Licząca 145 stron rozprawa składa się z części wstępnej (pominiętej w numeracji rozdziałów), sześciu rozdziałów, podsumowania, bibliografii oraz czterech dodatków obejmujących schematy, zestawienia aparatury itp.

Dość obszerną (25 stron) część wprowadzającą otwiera czterostronicowe *Wprowadzenie*, które jest próbą umiejscowienia tematyki pracy w obszarze energoelektroniki i jej zastosowań – w tym przypadku transformatorowych twardoprzełączających przekształtników prądu stałego w szczególności przeznaczonych do współpracy z odnawialnymi źródłami energii (OZE). Niestety, obok fragmentów napisanych na dobrym poziomie pojawiają się stwierdzenia dosyć ryzykowne (np. s. 9 „Komercyjne moduły PV, ogniwa paliwowe i zasobniki energii elektrycznej dostarczają energię elektryczną o napięciu stałym w zakresie (12-48) V”, nieprecyzyjne (s. 8 „... konwencjonalny przekształtnik musi pracować z maksymalnym współczynnikiem wypełnienia, aby uzyskać duży współczynnik wzmocnienia napięcia” czy wręcz niezrozumiałe dla czytelnika (s. 10 „Dla nowych typów układów i połączeń doskonałym przekształtniki istotnym wsparciem są nowe technologie przyrządów półprzewodników i elementów magnetycznych”). W efekcie czytelnik ma do czynienia z tekstem nierównym, co odnieść można także do kolejnej części zatytułowanej *Stan wiedzy*. Autor na 10 stronach precyzuje obszar zastosowań i dokonuje przeglądu literatury w obszarze transformatorowych przekształtników prądu stałego o dużej przekładni napięciowej omawiając podstawowe układy napotkane w literaturze przedmiotu. Porusza także tematykę elementów półprzewodnikowych i magnetycznych. Przedstawione rozważania, nie wolne od stwierdzeń kontrowersyjnych (np. s. 19 „ Wyższe harmoniczne z kolei potęgują straty stałoprądowe ..”) i nie do końca zrozumiałych czy precyzyjnych (s. 18 stwierdzenie o wartości szczytowej prądu wstecznego rzędu kilku amperów), prowadzą Autora do motywacji pracy czyli stwierdzenia o brakach wiedzy w zakresie twardoprzełączających przekształtników transformatorowych o dużym wzmocnieniu napięciowym i wysokiej sprawności, zdolnych do pracy przy mocach powyżej 1 kW. W dalszej części *Wprowadzenia* powraca przegląd literatury – Autor przedstawia precyzyjny opis wraz ze schematami oraz porównanie 19 różnych topologii układowych przekształtników transformatorowych o dużym współczynniku wzmocnienia. Mimo braku najświeższych pozycji literaturowych (najnowsza publikacja pochodzi z r. 2014) należy wysoko ocenić tę część pracy, ponieważ świadczy o dobrej znajomości literatury, ale jest też dosyć dobrze napisana – styl tekstu poprawia się gdy Autor przechodzi do konkretów. W zasadzie do tej części oraz następujących po niej *Wnioskach z zestawienia* można mieć tylko drobne zastrzeżenia – n.p. niepotrzebne jest analizowanie udziałów procentowych w arbitralny sposób dobranym zestawieniu publikacji. Ponadto, przywołane są układy o mocy 2 i 3 kW oraz dosyć wysokiej sprawności, co przeczy wcześniejszym stwierdzeniom o braku takich układów w literaturze, co zresztą przyznaje na s. 31 Autor pisząc o „nielicznych na świecie badaniach”. Na koniec części wprowadzającej w sposób poprawny sformułowane zostają teza:

„Izolowane przekształtniki podwyższające DC/DC zasilane niskim napięciem wejściowym, pracujące przy dużych prądach wejściowych, mogą osiągnąć wysoką sprawność energetyczną i duży współczynnik wzmocnienia napięcia poprzez równoległe połączenia przekształtników oraz usprawnienie elementów magnetycznych wysokiej częstotliwości”

i cel pracy

„... zbadanie możliwości zmniejszenia strat w procesie przekształcania energii za pomocą połączonych równoległe izolowanych przekształtników podwyższających napięcie DC/DC pracujących przy niskim napięciu wejściowym i wysokim napięciu wyjściowym dla osiągnięcia wysokiej sprawności energetycznej i dużego współczynnika wzmocnienia napięcia oraz uzyskanie odpowiedzi jaki wpływ mają zmodyfikowane elementy magnetyczne na efektywność przekształtników”

oraz zdefiniowane zostają zadania badawcze.

Rozdział kolejny (oznaczony jako pierwszy) zawiera krótkie, 5 stronicowy szkic i charakterystykę podobwodów przekształtników DC/DC, którymi w dalszej części zajmuje się Autor. Omawiane są więc m.in. różne struktury prostowników oraz falowników prądu stanowiących stopień wejściowy przekształtników. Przedstawione rozważania są dosyć lakoniczne, wydaje się, że kolejność przedstawiania zagadnień (np. falowniki po prostownikach) nie była chyba do końca przemyślana.

Kolejny rozdział przedstawia możliwe rozwiązanie izolowanego przekształtnika DC/DC o dużym wzmocnieniu napięciowym – układ półmostkowy zasilany przez dwa dławiki, który jest układem bazowym czy punktem odniesienia do dalszych rozważań. Na 19 stronach Autor pokrótce omawia zasadę działania i przedstawia podstawowe zależności opisujące przekształtnik, w tym niektóre zupełnie zbędne (do czego służy wyprowadzona zależność na wartość skuteczną napięcia na tranzystorze na str. 41 ?). Następnie pokazany jest projekt przekształtnika wraz z transformatorem o mocy 200-1500 W zasilanego z napięcia 24-50V o napięciu wyjściowym 350V. W kolejnym kroku Autor przedstawia badania symulacyjne dla jednego wybranego punktu pracy omawiając najważniejsze przebiegi i – co jest nie do końca zrozumiałe – w kilku kwestiach odsyła czytelnika do kolejnych rozdziałów rozprawy (np. na str. 46 traktuje tak zagadnienie strat komutacyjnych). Następnie, w uzupełnieniu do badań symulacyjnych przedstawione są wyniki badań laboratoryjnych modelu o mocy 1 kW, które w większości potwierdzają analizy przeprowadzone przy pomocy komputera. Autor identyfikuje kluczowy problem omawianego przekształtnika – przepięcia i oscylacje występujące w trakcie wyłączania tranzystorów MOSFET, choć w mojej ocenie nie do końca jasno tłumaczy genezę ich powstawania. Przedstawia też charakterystyki, m.in. sprawności energetycznej układu, które wskazują, że nie spełnia on sprecyzowanych na wstępie rozprawy wymagań (> 95%). Na koniec rozdziału Autor przedstawia wnioski z badań dotyczące możliwych sposobów poprawy sprawności układu. W zasadzie są one słuszne i trudno się z nimi nie zgodzić, ale mają one jedną podstawową wadę – zostały wysnute raczej intuicyjnie ponieważ w rozdziale 3 Autor nie przedstawiał analizy strat mocy.

W następnym rozdziale Autor przedstawia na 50 stronach zasadniczą część pracy tzn. analizę zasady działania, badania symulacyjne i eksperymentalne transformatorowego półmostkowego przekształtnika podwyższającego napięcie ze zintegrowanym dławikiem wejściowym. Rozdział ten należy ocenić bardzo wysoko, ponieważ poprzez modyfikację topologii układu a także optymalizację elementów magnetycznych zostały osiągnięte cele postawione na wstępie rozprawy. Analiza i projekt zaproponowanego układu są przedstawione na ogół poprawnie, przy czym ponownie pojawiają się elementy zbędne (wzory na wartości

skuteczne napięcia tranzystora na str. 65 czy diody na str. 67, wzór na energię dławika na str. 69) czy dyskusyjne (dobór napięciowy tranzystorów i diod str. 66). Istotną część rozdziału zajmują opisy projektu integrowanego z dławikiem wejściowym transformatora wyrównawczego oraz transformatora separującego, wraz z odniesieniem się do tematyki optymalizacji uzwojeń tego transformatora pod kątem ograniczenia ich rezystancji pochodzącej od wyższych harmonicznych. Autor przedstawia krok po kroku procedurę projektową poszczególnych elementów magnetycznych ilustrując rozważania obliczeniami. Pewien niedosyt pozostawia tu fakt, że obok powszechnie znanych zależności pojawiają się wzory charakterystyczne dla omawianego układu (m.in. 3.27, 3.39), których wyprowadzenia nie są podane, choćby w załączniku. Na tym tle zdecydowanie na plus wyróżnia się podrozdział 3.3.1 z poprawnie przeprowadzonymi, ilustrowanymi kształtem przebiegów, wyprowadzeniami. Za drobną niezręczność Autora należy uznać podawanie schematów algorytmu projektowania na koniec omawianej procedury projektowej, wydaje się, że powinny one być umieszczane na początku każdego z podrozdziałów. W pracy umieszczono także czarno-białe zdjęcia wykonanych elementów magnetycznych, ale zabrakło wymiarów geometrycznych, które umożliwiałyby oszacowanie ich objętości.

Podobnie jak w poprzednim rozdziale przedstawiona została analiza symulacyjna dla wybranych punktów pracy oraz badania eksperymentalne modelu o mocy maksymalnej równej 1,5 kW. Przedstawione przebiegi wskazują na poprawną pracę układu, można przy tym odnotować równy podział prądu w tranzystorach oraz lepszą jakość przebiegów m.in. niższy poziom oscylacji napięć na tranzystorach. Autor przedstawił, podobnie jak w poprzednim podrozdziale, oscylogramy dla jednego punktu pracy leżącego znacznie poniżej mocy znamionowej, przy $U_{WE} = 24\text{ V}$, $D = 0,54$, $R_O = 120\ \Omega$ jest to moc ok. 370 W. Brak przebiegów dla warunków znamionowych tzn. mocy 1,5 kW i napięcia wyjściowego równego 350V należy uznać za istotne niedociągnięcie, choć należy nadmienić, że Autor przedstawił szereg charakterystyk z analizatora mocy przy obciążeniach nawet do 1,75 kW. Są one na pewno interesującą ilustracją zachowania się proponowanego układu w różnych punktach pracy i przy różnych parametrach. Zabrakło także dosyć istotnej charakterystyki – przy stałym napięciu wyjściowym równym znamionowemu (350 V). Wydaje się, że w perspektywie współpracy omawianego układu DC/DC z falownikiem mogła by być ona szczególnie interesująca. Analiza przedstawionych charakterystyk wskazuje, że w wielu obszarach układ przekracza założoną sprawność energetyczną 95%, choć szczytowe sprawności uzyskane zostały dla mocy poniżej 1 kW.

W podrozdziale 3.6. Autor podjął próbę zmierzenia się z problematyką strat mocy w elementach magnetycznych i półprzewodnikowych. Pomimo drobnych niejasności, na przykład dotyczących warunków termicznych, udało mu się zidentyfikować główne źródła strat, które pojawiają się w tranzystorach, przede wszystkim w trakcie ich wyłączania. Rozdział kończy się podsumowaniem uzyskanych wyników, należy zgodzić się z Autorem, że proponowany układ znacząco przewyższa parametrami układ z poprzedniego rozdziału.

Zdecydowany niedosyt u czytelnika rozprawy pozostawia lektura bardzo krótkiego (11 stron) rozdziału czwartego, który omawia kolejną modyfikację topologii – układ quasi-równoległy. Stanowi on połączenie dwóch omawianych w poprzednim rozdziale układów z transformatorem wyrównawczym: równoległe po stronie pierwotnej a szeregowo po stronie wtórnej. W ten sposób Autor uzyskał możliwość poprawnej pracy przy wyższej przekładni napięciowej i wyższych mocach obciążenia (do 3kW). W rozdziale pokrótce omówiona jest zasada działania układu oraz projekt przekształtnika przeznaczonego do pracy przy mocy w zakresie od 200 W do 3 kW. Następnie przedstawione są wyniki badań symulacyjnych, przy czym ponownie przebiegi są pokazane dla mocy dużo niższej od znamionowej, i wyglądają one w sposób zbliżony do tych z poprzedniego rozdziału. Niestety, Autor nie przedstawił

zestawienia prądów w poszczególnych elementach, które pokazywałyby podział prądu wejściowego – jest to kluczowe zagadnienie dla równolegle łączonych przekształtników. Przedstawione wyniki eksperymentalne również przedstawiają wiele do życzenia – podano jeden oscylogram (brak podanych warunków pracy) oraz dwa zrzuty ekranu z analizatora mocy. Na tej podstawie można stwierdzić, że model działał z mocą niemal 3 kW przy napięciu wyjściowym 700V, ale trudno tu mówić o jakiegokolwiek głębszej analizie.

Rozdział piąty zawiera porównanie trzech badanych układów, także w stosunku do układów znanych z literatury. W zasadzie trudno się nie zgodzić z Autorem, że przedstawiane w rozprawie przekształtniki dorównują a nawet w niektórych punktach przewyższają te znane z literatury przedmiotu. Z drugiej strony, biorąc pod uwagę wyeksponowany w tezie rozprawy parametr sprawności energetycznej, uzyskana maksymalna sprawność rzędu 96,3% nie przekracza tej dla wybranych układów uwzględnionych w przeglądzie literatury (prace [51], [53], [55]) – tym bardziej, że nie uwzględnia on ostatnich rozwiązań przedstawianych po roku 2014.

Pracę kończy krótki rozdział podsumowujący wyniki badań o raz zestawienie osiągnięć Autora. Rozprawa zawiera cztery dodatki i bogatą bibliografię, na którą składa się 158 pozycji, przede wszystkim publikacji naukowych w czasopismach międzynarodowych. Duża liczba pozycji literaturowych ale przede wszystkim poprawne odwoływanie się do nich w tekście rozprawy świadczy o biegłej znajomości tematyki. Przy tym wydaje się, że kolejność powinna być odwrotna i dodatki powinny występować po bibliografii.

Strona redakcyjna pracy jest na ogół poprawna, choć zdarzają się Autorowi proste błędy takie, jak n.p. pojawianie się rysunków lub tabel przed odniesieniem się do nich w tekście. Używana terminologia jest właściwa a język w większości pracy na odpowiednim poziomie, choć zdarzają się sformułowania nie do końca jasne lub precyzyjne. Chronologia prezentowanej tematyki jest poprawna a treść rozdziałów odpowiada ich tytułom. Rysunki są w większości czytelne i przejrzyste co ułatwia ocenę uzyskanych wyników symulacyjnych i eksperymentalnych. Wyjątkiem są nienaturalnie zmniejszone przebiegi teoretyczne prądów i napięć (np. rys. 2.1.b)

3. Uwagi ogólne

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

1. Na str. 53-54 Autor analizuje zasadniczy problem oscylacji napięcia i prądu występujących w trakcie wyłączenia tranzystora MOSFET w badanym układzie przekształtnikowym. Przy tym rys. 2.11 sugeruje, że istotna jest tu indukcyjność pasożytnicza źródła L_S a w tekście wskazana jest jednak indukcyjność rozproszenia L_σ . Proszę o dokładne określenie natury występujących zjawisk rezonansowych wsparte odpowiednim schematem.
2. Sposób doboru napięciowego tranzystorów MOSFET wymaga lepszego objaśnienia. Na str. 66 podano zależność 3.19 określającą maksymalne napięcie w stanie ustalonym (tu 120V), skąd przy założeniu 20% zapasu dobrano elementy o napięciu 150V. Jednak zmierzone przebiegi napięcia dren-źródło (np. rys. 2.12) wskazują, że w trakcie wyłączenia elementu pojawiają się napięcia chwilowe przekraczające prawie blisko 3-krotne (90V przy 30V) napięcie w stanie ustalonym.

Wydaje się, że tranzystor przy wyższych napięciach i współczynnikach wypełnienia wchodzi w tryb przebicia lawinowego. Czy zatem przy jego doborze nie powinno się brać pod uwagę także parametrów takich jak powtarzalna energia przebicia lawinowego E_{AS} ?

3. Diody SiC Schottky'ego mają lepsze właściwości łączeniowe, ale gorsze parametry statyczne od ultraszybkich diod krzemowych. Dlatego przy częstotliwości przełączania poniżej 20 kHz wybór elementów SiC może być uznany za dyskusyjny, szczególnie, że przy napięciu wyjściowym nie przekraczającym 400V zastosowano elementy o napięciu przebicia 1200V. Czy Autor mógłby lepiej uzasadnić wybór takich diod ?
4. Na str. 103-105 Autor podejmuje temat bilansu strat w elementach półprzewodnikowych, przy czym nie pada ani jedno słowo na temat warunków termicznych. W rozprawie brak jest też zmianek o zastosowanych systemach chłodzenia. Proszę o krótkie uzupełnienie tej problematyki i podanie dla jakich temperatur złącz były obliczone straty przewodzenia w tabelkach na str. 105 ?
5. Dobór tranzystora MOSFET o bardzo dużym prądzie (171 A) i niskiej rezystancji przewodzenia ($4.8 \text{ m}\Omega$) przekłada się na niskie straty przewodzenia (wg. tab. 3.8 do 3.14 W). Z drugiej strony, dużej powierzchni złącza towarzyszą istotne pojemności pasożytnicze, które mogą być przyczyną dużych oscylacji w trakcie wyłączania i zwiększonych strat łączeniowych (wg. tab. 3.8 oszacowano do 20,73 W strat wyłączania). Czy w związku z tym Autor nie próbował (np. używając symulacji) użyć tranzystorów o wyższej rezystancji przewodzenia a niższych pojemnościach pasożytniczych ?
6. W rozprawie przedstawiane są zazwyczaj oscylogramy dla warunków dalekich od znamionowych – czy udało się Autorowi zarejestrować przebiegi przy napięciu wyjściowym 350 V i mocy 1.5 kW (dla układów pierwszego i drugiego) oraz 700V i 3 kW dla układu quasi-równoległego ?
7. Zdecydowanie zabrakło w rozdziale 4 wykazania, że w proponowanym układzie quasi-równoległym prąd wejściowy dzieli się równo pomiędzy cztery gałęzie dwóch połączonych przekształtników. Czy Autor dysponuje przebiegami z symulacji lub eksperymentu, które potwierdziłyby, że taka sytuacja ma miejsce w proponowanej topologii ?
8. Dążenie do bardzo wysokiej sprawności zazwyczaj odbywa się kosztem innych parametrów przekształtnika takich, jak objętość czy gęstość mocy, których to parametrów (podobnie jak zdjęć całości badanych układów) nie da się znaleźć w rozprawie. Czy Autor próbował określić te parametry dla opracowanych przekształtników ?

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
7	25	Stwierdzenie o urządzeniach „mało agresywnych dla środowiska naturalnego” nie jest zbyt fortunne

8	-	UPS, HID – brak rozwinięcia używanych skrótów
8	16-17	Zakres napięcia 12-48V dotyczy tylko układów małej mocy, np. stosowane są zestawy ogniw fotowoltaicznych o napięciu do 1 kV
10	19	Użycie terminu „wątpliwości” nie do końca tu pasuje
10	24	Stwierdzenie „fragmentów niewiedzy” nie jest zbyt fortunne
12	3	Sieć AC = sieć prądu przemiennego
12	5	Szyna DC/DC ?
12	9	Superkondensatory jako magazyny energii w systemie elektroenergetycznym nie są chyba stosowane
14	Rys. 4c	Błąd w oznaczeniu polaryzacji napięcia wyjściowego
14	19	Stwierdzenie o „argumentie jednego elementu indukcyjnego” nie jest zrozumiałe
15	16-18	Błędna składnia zdania „Przekształtniki półmostkowe ...”
16	10	Chyba chodzi o „przekładnię” a nie „przełożenie”
16	16	Zdanie „W układach izolowanych ...” jest nie do końca trafna opinią
18	1	„podzielony na obwody umożliwiające podział”
19	20	Transformatory chyba nie mogą wywołać dużej rezystancji ?
19	25	„Wyższe harmoniczne z kolei potęgują straty stałoprądowe” – chyba zmiennoprądowe ?
21	5	Stwierdzenie o braku zastosowań komercyjnych jest dosyć ryzykowne.
28	4	„W zastosowaniach niskonapięciowych mocy” ?
34/35	-	Zdania od „Skuteczność filtracji ...” są nie do końca zrozumiałe
36	1	„Zasilanie prądowe” – sformułowanie nietrafne
39	13	Niezrozumiały cudzysłów przy sformułowaniu czysto
43,45	-	Podane wartości indukcyjności różnią się
47	9	„szpilki prądowe” ?
49	1	„Zbiór elementów ...” - nieprecyzyjne
53	12	Określenie „pojemności złączowe” jest niewłaściwe, można powiedzieć, że w skład Cds i Cgs wchodzi także pojemności złączowe ale ogólnie są to pojemności pasożytnicze

53	17-18	Tranzystor jest w pełni wyłączony gdy napięcie na bramce jest niższe od napięcia progowego.
55	4	załączaniu
60	22-23	Wydaje się, że chyba jest odwrotnie - ponieważ diody są spolaryzowane zaporowo to obwód wyjściowy jest odłączony od źródła zasilania
61	3.5	Nie do końca jestem pewny czy tu były potrzebne równania różniczkowe
63	10-11	Zdanie „W elementach ...” nie jest do końca zrozumiałe
66 i inne	-	Dioda Schottky’ego a nie Schottkiego
73	4	Brak komentarza do różnic w indukcyjności
80	13	Zdanie „Transformatory pracujące ..” zawiera błąd stylistyczny
90	15	Odwołanie do rysunku który jest stroną wcześniej
94	8 i dalej	Zdania „Źródła, których napięcia ...” są sformułowane dosyć niefortunnie
102	8	Zdanie „W celu obliczenia ...” brzmi jakby wzór dostarczał producent rdzenia
103	3-4	Udział strat przewodzenia i łączeniowych może kształtować się bardzo różnie, w zależności od użytych tranzystorów.
104	1	Klasyczna dioda Schottky’ego nie ma złącza P-N
104	28	Starty ?
106	3	Chyba elementach półprzewodnikowych
113	3	„Moc projektowa układy” ?
113	6-7	Zdanie „Układ powinien ..” zawiera błąd
125	17	Co to jest „zakres projektowanej mocy”
126	7-10	„hipotetycznych” i „hipotezy” w jednym zdaniu nie brzmi najlepiej
127	14	„zglobione badania” ?
131	C.1	Tektronix DPO; w p. 4 pasmo sondy to chyba 100 MHz ?

5. Ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska zawiera części analityczną, symulacyjną i przede wszystkim eksperymentalną dla trzech typów przekształtników energoelektronicznych, które to części mimo wymienionych powyżej uwag należy ocenić zdecydowanie pozytywnie. Autor sformułował tezę, którą udowodnił, w szczególności przeprowadzając badania symulacyjne i eksperymentalne transformatorowych twardoprzełączających przekształtników DC/DC o bardzo dużej przekładni napięciowej i mocach powyżej 1 kW. Zaproponowane rozwiązania z zawansowanymi elementami magnetycznymi i równoległym połączeniem przekształtników pracują poprawnie przy częstotliwości 19,5 kHz i wykazują lepsze parametry energetyczne od większości rozwiązań literaturowych. Wyniki tych badań należy uznać za istotne, co potwierdzają publikacje w czasopismach oraz na konferencjach krajowych. Wnoszą one liczący się wkład w poszerzenie stanu wiedzy z zakresu projektowania twardoprzełączanych transformatorowych przekształtników DC/DC o bardzo dużej przekładni napięciowej i wysokiej sprawności energetycznej. Autor wykazał się dobrą znajomością energoelektroniki i elektroniki a w szczególności metod analizy obwodów energoelektronicznych, metod projektowania elementów magnetycznych, technik symulacji komputerowej oraz prowadzenia badań eksperymentalnych w obszarze przekształtników napięcia stałego.

Za osiągnięcia własne Autora uznaję:

- zaproponowanie oryginalnej topologii z równoległo-szeregowym połączeniem przekształtników transformatorowych DC/DC,
- przedstawienie i zrealizowanie koncepcji zaawansowanego elementu magnetycznego zawierającego dławik wejściowy i transformator wyrównawczy,
- opracowanie trzech modeli laboratoryjnych transformatorowych przekształtników DC/DC o dużej przekładni napięciowej, w tym wykonanie ich projektu oraz analiz symulacyjnych,
- przeprowadzenie cyklu eksperymentów z wykorzystaniem opracowanych układów,
- dokonanie porównania trzech badanych topologii przekształtników, w tym z rozwiązaniami znanymi z literatury.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa przedstawiona przez mgr inż. Adama Krupy pt. „**Izolowane przekształtniki podwyższające DC/DC zasilane z niskonapięciowych źródeł energii**” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje wysoki poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej z zakresu energoelektroniki, 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 oraz, że może być dopuszczona do publicznej obrony.

