

Dr hab. inż. Marcin Kasprzak, prof. PŚ.
Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki
ul.B.Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

Gliwice, dn. 08.08.2025 r.

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 11.08.2025

Zarejestrowano pod nr 510-1.6/25

Podpis 

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Folmera

pt. „Wielopoziomowe przekształtniki DC-DC z tranzystorami z azotku galu GaN”

opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika,
Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne (Akademia Górniczo-Hutnicza)

dr hab. inż. Ryszarda Sroka, prof. AGH

(pismo nr: L.Dz. RD AEEITK/510-1-1/25 z dnia 09.06.2025 roku).

1. Wprowadzenie

Przedmiotem rozprawy są przekształtniki DC/DC podwyższające napięcie stałe, w szczególności takie, które działają na zasadzie przełączanych kondensatorów (SCC-*Switched Capacitor Converter*). Przekształtniki takie mają pewne cechy, które są korzystne w porównaniu do klasycznych przekształtników DC/DC z elementami magnetycznymi. Do korzystnych cech można zaliczyć możliwość gromadzenia energii w nowoczesnych kondensatorach o dużej (np. objętościowej) gęstości gromadzonej energii, wyższej niż w elementach magnetycznych. W przekształtnikach SCC występują również cewki indukcyjne, ale pełnią one rolę pomocniczą np. jako elementy obwodu rezonansowego. Korzystnym jest również to, że w wielopoziomowych SCC wiele podzespołów przekształtnika pracuje przy napięciu strony niskiej lub wartości pośredniej względem strony niskiej i wysokiej.

Wadą SCC jest ograniczona możliwość sterowania napięciem wyjściowym, bo tylko z wąskiego pasma wokół wartości dyskretnej zależnej od liczby poziomów przekształtnika. Ze względu na swoje zalety oraz możliwości aplikacyjne np. w instalacjach z panelami fotowoltaicznymi lub z ogniwami paliwowymi konieczne jest prowadzenie systematycznych badań takich nowych przekształtników.

Istotnym kierunkiem takich badań jest skonstruowanie układu o możliwie najwyższej sprawności energetycznej, co uzyskiwane jest przez zastosowanie nowoczesnych tranzystorów, podobwodów rezonansowych i wykorzystanie ich częściowo do realizacji miękkiego (możliwie bezstratnego) przełączania tranzystorów. Powyższa, istotna problematyka znalazła odzwierciedlenie w niniejszej rozprawie doktorskiej.

Główna tematyka pracy dotyczy rezonansowego przekształtnika z przełączanymi kondensatorami, o maksymalnie 6-cio krotnym wzmocnieniu, możliwością siedmio-stopniowej gradacji napięcia wyjściowego, zbudowanego na tranzystorach CoolMOS i CoolGaN z przełączeniami ZCS lub ZVS, o mocy ok. 700W. Jest to przekształtnik o nowatorskiej topologii, opatentowany wspólnie z promotorem, w pracy oznaczany jako HVGDCC (ang. High Voltage Gain Direct Current Converter). Przekształtnik zbudowano oraz przeanalizowano wielowariantowo: teoretycznie, symulacyjnie i laboratoryjnie.

Przekształtniki rezonansowe są jednym z obszarów działań naukowo-badawczych prowadzonych od lat na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej. Warto w tym kontekście podkreślić, że recenzowana praca jest więc dobrą kontynuacją tematyki przekształtników rezonansowych i swego rodzaju promocją przekształtników SCC, które wg mnie nie znalazły szerokiego

M.Kasprzak, recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Folmera pt. „Wielopoziomowe przekształtniki DC-DC z tranzystorami z azotku galu GaN”

zastosowania w rozwiązaniach komercyjnych. Przyczyną tego może być brak informacji o zaletach i wadach tych przekształtników, o celowości ich stosowania oraz brak odpowiedzi na pytanie, czy zastąpienie dotychczasowych urządzeń nowymi przyniesie wymierne efekty.

2. Strona formalna rozprawy

Rozprawa została zawarta w 7 rozdziałach, zawiera wykaz ważniejszych oznaczeń oraz streszczenie w językach polskim i angielskim. Rozdział 1 to wprowadzenie, w którym określono między innymi tezę, aktualny stan wiedzy i cele badawcze. Dwa kolejne rozdziały (nr 2 i 3) to obszernie, główne rozdziały merytoryczne w których kolejno opisano zasadę działania, możliwości sterowania napięciem wyjściowym, tryby pracy ZSC i ZVS, modele obliczania strat mocy oraz sprawności. Rozdział 4 to badania symulacyjne w Matlab-Simulink a rozdział 5 to wyczerpujący opis badań eksperymentalnych. Rozdział 6 to podsumowanie, wnioski, wykaz osiągnięć, które autor uznał za oryginalne i samodzielne oraz obszerna lista publikacji naukowych przy współudziale autora. Rozdział 7 to załączniki zawierające schematy przekształtników. Ostatni rozdział to bibliografia (118 pozycji) którą błędnie znumerowano również jako rozdział 7. Rozprawa jest obszerna i zawiera 240 stron nie licząc załączników i bibliografii, około 124 rysunków, 19 tabeli i 69 zależności.

Ma ona istotne elementy rozprawy naukowej, a mianowicie:

- motywację, której autor nie podaje wprost, ale we wprowadzeniu ujmuje jako: aktualny obszar badawczy w świetle dynamicznych zmian związanych z transformacją energetyczną, rozwojem energetyki rozproszonej, a w szczególności mikroinstalacji fotowoltaicznych, co bezpośrednio przekłada się na wzrost potencjału aplikacyjnego wielopoziomowych przekształtników rezonansowych o wysokim wzmocnieniu napięciowym, wysokiej sprawności osiąganego za sprawą np. wykorzystania tranzystorów z azotku galu (GaN),
- cele badawcze, które przedstawiono w rozdziale 1.4,
- obszerne wyniki badań własnych, 2 nowych przekształtników HVGDC z tranzystorami CoolMOS i CoolGaN, które autor analizował teoretycznie i badał laboratoryjnie oraz
- wnioski.

Praca zawiera wykaz literatury obejmujący 118 pozycji, w tym 11 pozycji współautorstwa doktoranta oraz 19 dokumentacji technicznych i adresów stron internetowych. Wykaz literatury jest reprezentatywny dla tematu rozprawy, a recenzentowi nie jest znane opracowanie takie, jakie stanowi rozprawa.

Od strony formalnej nasuwają mi się uwagi w większości pozytywne:

- Brak błędów edytorskich (literówek) i błędnych form wyrazów, prawidłowe użycie czcionek we wzorach, prawidłowo pisane jednostki,
- Na podkreślenie zasługuje bardzo dobra edytorska strona rysunków, wykresów i zdjęć. Rysunki są czytelne, opisy wykonane czcionką odpowiedniej wielkości, nieco gorzej oznaczone są skale u/i/t na oscylogramach.
- Jako uwagę negatywną uznać można zbędną drobiazgowość niektórych opisów, wyjaśnienia spraw oczywistych (np. potrzeby stosowania przetwornic izolowanych do zasilania sterowników bramkowych – dwa identyczne ich opisy na str. 156 i 161), oczywistą procedurę uruchamiania przekształtnika (str.170) co pogarsza czytelność pracy i zwiększa jej objętość.



3. Przedmiot pracy, cele badawcze i teza

Przedmiotem rozprawy jest przekształtnik DC/DC podwyższające napięcie stałe, który działa na zasadzie przełączanych kondensatorów, z pomocniczym dławikiem rezonansowym, o maksymalnie 6-cio krotnym wzmocnieniu, z możliwością siedmiostopniowej gradacji napięcia wyjściowego, zbudowanego na dwóch wersjach tranzystorów tj. CoolMOS i CoolGaN oraz w dwóch wersjach sterowania, tj. z przełączeniami ZCS lub ZVS, o mocy ok. 700W i napięciu wyjściowym ok. 400V dla wzmocnienia równego 6. Jest to przekształtnik o nowatorskiej opatentowanej topologii, w pracy oznaczany jako HVGDC.

Cele badawcze doktorant sformułował następująco:

- Badanie stanu wiedzy i techniki w dziedzinie wielopoziomowych przekształtników DC/DC o przełączanych kondensatorach.
- Potwierdzenie korzystnych cech opracowanego przekształtnika, takich jak: wysokie wzmocnienie napięciowe, wysoka sprawność, niskie robocze napięcia łączników i możliwość wielostopniowej gradacji napięcia wyjściowego.
- Analiza strat energii w obwodach mocy przekształtnika.
- Przeprowadzenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych a w tym zbadanie wpływu rodzaju łącznika na właściwości energetyczne przekształtnika.

Autor sformułował również zwyczajowo tezę pracy – w tym przypadku nie było to konieczne, ponieważ podano cele badawcze, a na końcu pracy potwierdzono ich realizację. Tezę sformułowano więc nieco sztucznie, możliwe, że w zaawansowanym stanie pracy. Autor prawdopodobnie spodziewał się zdecydowanie wyższej sprawności przekształtnika z CoolGaN przy pracy z ZVS, niż podniesionego w tezie problemu redukcji wartości prądów związanych z ładowaniem pojemności wyjściowej łączników dla CoolGaN, co wg mnie nie było przewidywalne bez wcześniejszych pomiarów, ponieważ C_{oss} i $R_{DS(on)}$ obu typów tranzystorów mają zbliżone wartości. Temat ten podniosłem w uwagach dyskusyjnych.

Autor nie podał wprost jak planował osiągnąć podane cele badawcze (metodyka, plan zadań badawczych). Natomiast po ostatecznej lekturze całej pracy oraz rozdz. 1.5 (struktura pracy) stwierdzam, że zastosował prawidłową metodykę i zrealizował następujące zadania badawcze, które w skrócie są następujące:

- sformułowanie założeń oraz opracowanie modeli matematycznych przekształtników,
- wyprowadzenie zależności opisujących wielkości w obrębie przekształtnika (u , i , p),
- weryfikacja eksperymentalna rozważań teoretycznych, obliczeń i symulacji numerycznych,
- opracowanie, dyskusja, analiza porównawcza oraz generalna konkluzja będąca wynikiem rozważań teoretycznych i badań eksperymentalnych przekształtników.

4. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozdz. 1 - Wprowadzenie

Rozdział ma 25 stron i zawarto w nim tezę, przegląd literatury i cele badawcze.

Przegląd literatury zawiera rozważania dotyczące przekształtników z przełączanymi kondensatorami, rozpoczynając od układów tzw. pomp ładunku (*Charge Pump*: Dickson, Leader, Fibonacci, ..), tj. układów bez obwodów rezonansowych. W kolejnych przykładach zaprezentowano modyfikacje znanych układów rozbudowanych o obwody rezonansowe.

Wskazano wady i zalety opisywanych w literaturze rozwiązań, co stało się bazą do opracowanie układu HVGDCC będącego przedmiotem pracy.

W mojej ocenie rozdział ten jest wystarczającym wprowadzeniem do tematyki pracy. Jediną uwagą jest to, że teza pracy powinna być sformułowana po przeglądzie literatury jako wynik analizy stanu aktualnego i nowego pomysłu autora.

Rozdz. 2. Przekształtnik HVGDCC

Rozdział ma aż 73 strony i zawiera opis działania przekształtnika oraz jego najważniejszych właściwości wynikające z analizy teoretycznej. Do opisu działania zastosowano czytelny szablon: analiza w 6 przedziałach czasowych z odwołaniem do 4 schematów zastępczych M1-M4. Na pierwszym ze schematów zastępczych z rys.2.3 można było podać numery podzespołów, ponieważ czytelnik musi odwoływać się do innego rysunku z ich numeracją, np. do rys.2.1. W kolejnym podrozdziale wyznaczono wzmocnienie napięciowe układu $G_U=6$. W część tej kilkakrotnie pod zależnościami 2.8-2.16 powtarzane są niepotrzebnie te same nazwy oznaczeń. Następnie autor bardzo skrupulatnie opisał pracę układu i schematy zastępcze dla wszystkich 7 dyskretnych wartości wzmocnienia układu (1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6), bazując aż na 10 możliwych schematach zastępczych M1-M10. W powyższych opisach (rozd.2.1-2.4) autor nigdzie nie podał wprost, że układ pracuje w warunkach ZCS. Dopiero na początku rozdz.2.5 opisuje techniki przełączanie miękkiego i twardego, zaskakując czytelnika opisem pracy HVGDCC z ZVS. Do opisu przełączania ZVS mam uwagę, którą zamieściłem w części „uwagi dyskusyjne”.

Podrozdziały 2.6-2.8 dotyczą obliczania strat mocy w przekształtniku z wykorzystaniem zależności analitycznych. Podano założenia upraszczające a następnie opisano modele strat dla kolejnych podzespołów przekształtnika. Następnie wyliczono wartości uśrednione (rms, av) prądów co dało podwaliny dla analitycznego modelu strat i sprawności (rozd.2.8), który to model obliczany będzie w rozdz.3. W części tej autor użył dość niefrasobliwego opisu strat łączeniowych (str.58), jako „nakładania się przebiegów napięcia i prądu” czy „strat związanych z nakładaniem się na siebie przebiegów napięcia i prądu a wartość strat odpowiada polu powierzchni pod wykresem tych przebiegów”. Ponadto mam wątpliwości co do poprawności zależności (2.52) na prąd źródła co uszczegółowiłem w części „uwagi dyskusyjne”.

Podrozdziały 2.9-2.10 to wyczerpujący projekt i dobór podzespołów przekształtnika, do którego nie mam zastrzeżeń a jedynie szkoda, że w obu układach nie zastosowano identycznych diod. Na rysunku 2.20 autor zamieścił model przekształtnika w LTspice, który niczego nie wnosi, ponieważ symulację sprawdzającą wykonano w Matlab Simulink, co opisano w rozdz.4.3.

Rozdz. 3. Analityczny model strat i sprawności przekształtnika HVGDCC

Rozdział jest zwięzły, ma 11 stron i zawiera wyniki obliczeń modelu uśrednionego w Matlab, którego podstawy opracowano poprzednim rozdziale. Model można uznać za szczegółowy, ponieważ umożliwił analizę mocy strat z rozbiciem na pojedyncze podzespoły i grupy (np. tylko tranzystory) w warunkach pracy ZCS. Na bazie strat cząstkowych wykreślono charakterystyki sprawności dla CoolGaN i CoolMOS. Zastanawiające jest, czy gdyby zastosować jednakowe diody w obu przekształtnikach, to o ile zmniejszyłaby się różnica w sprawności układów, czy nadal układ z CoolGaN miałby wyższą sprawność? Zadałem takie pytanie w części „uwagi dyskusyjne”.

Rozdz. 4. Badania symulacyjne

Rozdział ma 41 stron i zawiera wyczerpujące informacje i wyniki modelowania strat poprzez symulację w dziedzinie czasu. Najpierw ogólnie opisano model przekształtnika:



schemat modelu, generator sekwencji sterujących łącznikami oraz parametry sterowania (tab.4.1). Następnie opisano sposób modelowania obu łączników podając listę szczegółowych parametrów, w szczególności adaptację/opracowanie autorskiego modelu CoolGaN. Badania symulacyjne rozpoczęto od weryfikacji poprawności działania dla pracy ZSC, koncentrując się na kształtach przebiegów i warunków prądowo-napięciowych przełączeń tranzystorów. W kolejnym rozdz.4.4 opisano podobną, szczegółową analizę dla pracy ZVS. Najważniejsza część to rozdz.4.5 w którym wielowariantowo przedstawiono wyniki symulacji strat mocy komponentów i obliczeń sprawności. Najciekawszy jest porównawczy wykres sprawności (rys.4.3) obu przekształtników dla ZCS i ZVS. Auto prawidłowo skomentował kilkuprocentowe różnice w sprawności na korzyść CoolGaN, szczególnie w przedziale mocy poniżej 100W.

Rozdz. 5. Badania eksperymentalne

Najbardziej oczekiwany przez czytelnika rozdział ma aż 77 stron i zawiera wyczerpujące informacje na temat projektu przekształtników i zmierzonych strat mocy i sprawności. Dwa pierwsze podrozdziały to opis projektu obu przekształtników zawierający tabelaryczne zestawienia komponentów, schematy obwodów głównych i sterowników bramkowych oraz zdjęcia kompletnych PCB układów. Kolejny opis dotyczy kontrolera z FPGA odpowiedzialnego za sekwencję sterowania tranzystorów – w uwagach dyskusyjnych zapytałem o rozdzielczość sterowania. W kolejnym rozdziale podano wyczerpujący opis stanowiska pomiarowego skupiając się na sprzęcie pomiarowym, którego zestawienie (tab.5.3) można było przenieść do dodatków. Część dotyczącą zasadniczych pomiarów rozpoczęto od prezentacji 5 zestawów oscylogramów dla reprezentatywnego CoolGaN/ZCS i średniej wartości mocy, ok.300 W. Następnie potwierdzono możliwość sterowania napięcia wyjściowego realizując 7-stopniowy wykres schodkowy. Prezentując około 24 oscylogramów autor porównał i omówił przebiegi czasowe przekształtników w trybach ZCS i ZVS, zwracając uwagę na szczegóły przełączeń. Zdjęcia termowizyjne potwierdzają wyniki symulacji i tym wiąże się pytanie o temperaturę dławików w części „uwagi dyskusyjne”. Najważniejsza jest końcowa część rozdziału: 1) charakterystyki zewnętrzne $U_{wyj}=f(P)$ o średniej usterliwości jak na powielacz, tj. ok. 10% w zakresie mocy 50-600 W, 2) oczekiwane porównanie sprawności CoolGaN vs. CoolMOS dla ZCS i ZVS (rys.5.61). Wyniki pomiarów potwierdzają wyższą sprawność przekształtnika CoolGaN a autor poprawnie skomentował ich kształt.

Niezwykle istotne są wykresy porównawcze sprawności rys.5.62-5.63, ponieważ pokazują jakość modeli analitycznych oraz symulacyjnych, które niedoszacowują straty. Autor te różnice zauważył i poprawnie skomentował ich przyczyny. Część ta jest niezwykle ważna i powinna być wyodrębniona jako osobny podrozdział, który podsumowuje wkład pracy autora w opracowanie obu modeli komputerowych, ich pomiarową weryfikację i propozycje ich ulepszenia.

Rozdz. 6. Podsumowanie

W początkowej części autor przypomniał postawione cele badawcze i wykazał ich realizację, z czym w pełni się zgadzam. Podał 8 wniosków, z których wynika, że zastosowanie CoolGaN nie jest jednoznacznie korzystne w każdym przypadku z czym również się zgadzam. Podobnie praca z ZVS nie przynosi oczekiwanego zwiększenia sprawności w tym szczególnym przypadku. Wnioski nr 5 i 6 są raczej sformułowane na podstawie literatury lub intuicyjne, bo w pracy nie zwrócono uwagi na problem zmiany częstotliwości drgań własnych obwodów rezonansowych pod obciążeniem.

5. Ocena rozprawy

Tematyka rozprawy jest ściśle wbudowana we współczesne badania prowadzone w energoelektronice, a zwłaszcza w obszarze zaawansowanych przekształtników DC/DC, np. we współczesnej energetyce źródeł odnawialnych. W ujęciu ogólnym, uznaje się, że rozprawa obejmuje przede wszystkim opis znaczących osiągnięć konstrukcyjnych dotyczących nowych przekształtników DC/DC podwyższających napięcie, z przełączanymi kondensatorami, które charakteryzują się sprawnością do ok. 90-95%. Rozprawa obejmuje rozwiązanie problemu naukowego w postaci opracowania metodologii i wyników badań wybranej klasy przekształtników, w tym przypadku z przełączanymi kondensatorami, rezonansowych, wielopoziomowych. Ponadto, przedstawione rezultaty i wyniki badań mają bardzo istotne znaczenie przy realizacjach praktycznych omawianych przekształtników, np. w kontekście zastosowania w układach odnawialnych źródeł energii. W pracy doceniam to, że oba badane układy przeanalizowano metodycznie: analizowano teoretycznie pracę w poszczególnych przedziałach czasowych z odwołaniem do schematów zastępczych, wyznaczono analitycznie najważniejsze wartości prądów/napięć, opracowano modele komputerowe, zbudowano i przebadano model laboratoryjny, porównano wyniki pomiarowe z wynikami obliczeń modelu oraz przeprowadzono dyskusję wyników.

Do oryginalnych i najważniejszych rezultatów rozprawy zaliczam:

- wyprowadzenie zależności na straty mocy w poszczególnych komponentach przekształtnika HVGDCC w połączeniu z analitycznym modelem sprawności,
- opracowanie modeli symulacyjnych przekształtnika dla CoolMOS i CoolGaN, ZSC i ZVS, w środowisku Matlab-Simulink, w tym skryptów automatyzujących proces pozyskiwania danych w szerokim zakresie mocy a na tej podstawie charakterystyk sprawności,
- opracowanie programu dla sterownika z FPGA generującego sekwencję sterowania dla 7-miu wartości wzmocnienia napięciowego,
- zaprojektowanie przekształtników HVGDCC z CoolMOS i CoolGaN, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, w tym pomiarów mocy i wyznaczenie sprawności oraz porównanie wyników sprawności z krytycznym komentarzem,
- krytyczna weryfikacja modeli komputerowych sprawności w oparciu o wyniki pomiarów przekształtników.

Podsumowując stwierdzam, że doktorant działając w sposób metodyczny (analiza teoretyczna, symulacja komputerowa, eksperyment, dyskusja wyników):

- potwierdził poprawność działania opracowanego i opatentowanego przekształtnika HVGDCC,
- opisał jakościowo i ilościowo wybrane właściwości przekształtnika HVGDCC z CoolMOS i CoolGaN,
- przeanalizował analitycznie i symulacyjnie zagadnienia strat energii w obwodach mocy oraz wykazał sprawność energetyczną przedmiotowych układów wynosząca ok. 90-95%,
- przeprowadził badania eksperymentalne przedmiotowych przekształtników i potwierdził powyższe wartości sprawności,
- potwierdził możliwość uzyskania 7 wartości wzmocnienia napięciowego oraz pracy z warunkami przełączania ZCS i ZVS,
- potwierdził, że zastosowanie tranzystorów z azotku galu GaN umożliwia w porównaniu do przekształtnika z zrealizowanego z wykorzystaniem tranzystorów krzemowych MOSFET, redukcję wartości prądów związanych z ładowaniem pojemności wyjściowych łączników,

a przez to potwierdził zrealizowanie celu badawczego oraz tezę rozprawy. Ponadto, uznaje się, że podane w rozprawie wnioski końcowe są uzasadnione, rozprawa jest kompletna oraz zawiera opis istotnych osiągnięć konstrukcyjnych i nowe wyniki badań naukowych.

Ważniejsze uwagi dyskusyjne

Uwagi i pytania do doktoranta:

1. W streszczeniu napisano: „*Ponadto, zaproponowany przekształtnik cechuje wysoka sprawność realizacji procesu przekształcania energii, a wprowadzenie go w tryb pracy ZVS (ang. Zero Voltage Switching) umożliwia dalsze ograniczenie strat poprzez minimalizację tych związanych z występowaniem pojemności wyjściowej tranzystorów (Coss)*”. Jest to zaprzeczenie uzyskanych wyników zobrazowanych np. na rys.5.61, ponieważ każdy przypadek ZVS jest gorszy od ZCS, szczególnie dla układu z CoolGaN?
2. Według mnie, opis procesu przełączania ZVS zobrazowany grafami z rys.2.13a na rys.2.13b nie jest pełny. Po wyłączeniu Q2 lub Q3, prąd kondensatora C_2 rozdziela się „w dwóch kierunkach”, część prądu przeładowuje pojemność wyjściową tranzystora Q1 a pozostała część prądu przeładowuje pojemność wyjściową wyłączzonego tranzystora Q2 lub Q3. Dopiero później następuje graf rys.2.13b. W związku z powyższym, o ile przebieg opadania napięcia u_{Q1} (rys.2.14) jest poprawny to przebieg napięcia na wyłączonym Q2 lub Q3 powinien łagodnie narastać a nie zmieniać się skokowo. Uzasadnieniem mojego opisu jest to, że suma napięć na gałęzi Q1/D1/Q2/Q3 musi być równa napięciu zasilania – a w Pana przypadku tak nie jest. Czy przebiegi są wynikiem symulacji?
3. W tezie m.in. napisano, że „*zastosowanie tranzystorów z azotku galu GaN umożliwia w porównaniu do przekształtnika zrealizowanego z wykorzystaniem tranzystorów krzemowych MOSFET, redukcję wartości prądów związanych z ładowaniem pojemności wyjściowych łączników*”. Autor proces ten opisał i wyjaśnił szczegółowo na stronach 184-188, znajdując m.in. ścieżkę przepływu prądu przez wszystkie tranzystory gałęzi wejściowej Q1-Q3 oraz diodę D1. Wg mnie prąd ten nie płynie w jednym kierunku przez wszystkie podzespoły tej gałęzi (patrz. uwaga 2) jak można by zrozumieć autora analizując opis do rys.5.21a i ścieżkę przepływu oznaczoną kolorem czerwonym. Generalnie wyjaśnienie problemu przedstawione przez autora uważam za poprawne. Natomiast zastanawia mnie fakt, że zastosowanie CoolGaN mocno zredukowało wartości prądów ładowania pojemności wyjściowej łączników, skoro jego parametry nie różnią się radykalnie od CoolMOS: C_{oss} obu typów tranzystorów mają podobne wartości (53 pF i 72 pF) i identyczne $R_{DS(on)}=70\text{ m}\Omega$. Może problemem w układzie z CoolMOS była szybka dioda SiC o pojemności złącza 45 pF a więc nieco większej niż 33 pF diody w układzie CoolGaN?
4. Straty w obwodach bramkowych (str. 60). Autor podaje, że straty te nie przekraczają kilku watów co stanowi pomijalny ułamek mocy badanego przekształtnika (700 W). Można się z tym zgodzić dla pełnej mocy, ale jeśli ΔP_{DRV} to kilka, powiedzmy 5 W, to przy mocy np. 50-100 W daje to spadek sprawności o 5-10 punktów procentowych, co zupełnie zdeformuje charakterystyki sprawność zamieszczone w rozdz.5.6 w zakresie małych mocy. Przykładowo, straty na rezystancjach PCB nie zostały pominięte a ich wartość wynosi zaledwie 2,5 W przy pełnym obciążeniu. W związku z powyższym proszę o próbę oszacowania strat ΔP_{DRV} .
5. Proszę zweryfikować poprawność zależności (2.52) na prąd źródła I_{source} . Skoro przekształtnik jest idealny i ma wzmocnienie napięciowe 6, to $I_{source}=6*P_{out}/U_{in}=6*I_{out}$ Natomiast zależność (2.52) daje współczynnik $(0,91*6)*P_{out}/U_{in}$ a tym samym sprawność

przekształtnika wynosi 109,5%! Możliwe, że autor popełnił błąd w opisie analitycznym prądu w którymś z przedziałów pracy. A może recenzent przeoczył jakieś założenie - proszę o zweryfikowanie.

6. Jak w modelu symulacyjnym w Matlab-Simulink (rozdz.4.5) obliczane są straty w poszczególnych podzespołach? Czy Simscape Electrical Blocks to ułatwia, tzn. czy obliczanie strat mocy w konkretnym podzespole odbywa się samoczynnie (przez wbudowane procedury) czy może autor musiał stworzyć moduł, w którym te straty obliczane są z definicji mocy, jako iloczyn $u \cdot i$ podzespołu uśredniony za okres.
7. Czy autor przeprowadził obliczenia/symulacje sprawności, gdyby w obu przekształtnikach zastosowano jednakowe diody, jak w układzie z CoolGaN? Proszę to oszacować bez wykonywania złożonych symulacji, dla wybranej wartości mocy i ZCS korzystając z już obliczonych strat w diodach, np. przenosząc wartości strat w diodach z modelu CoolGaN do CoolMOS.
8. Sterownik z FPGA. W rozdziale 5 zamieszczono jego wyczerpujący opis, ale brak jest najważniejszej informacji, tzn. z jaką rozdzielczością możemy zmieniać interwały czasowe sterowania dla zegara 200 MHz, czy jest to 5ns czy może w torze sterowania są dzielniki częstotliwości? Czy rozdzielczość ogranicza uzyskanie lepszej jakości procesów komutacji?
9. Czy pominięcie strat związanych z naskórkowością uzwojeń (strat AC) i strat w rdzeniu w modelach analitycznych i symulacyjnych było słuszne (są niewidoczne na rys.3.2)? Wg mnie należało je prosto oszacować, choćby „zgadując materiał magnetyczny”. Na zdjęciach w termowizji rys.5.52 nie potrafię zidentyfikować temperatury dławików. Czy autor zwrócił uwagę na ich temperaturę i potwierdza słuszność pominięcia strat AC i w rdzeniu?

Uwagi szczegółowe:

Nr strony	Nr wiersza lub rysunku	Uwagi
4, 24, 27, ...		High Voltage Gain Direct Current Converter – wyjaśnienie tego skrótu, pomimo że znajduje się w wykazie akronimów pojawia się jeszcze niepotrzebnie kilka razy
10, 32, 33, ...		Moment, momencie (ok. 50 razy w całej pracy) – raczej powinno być w „chwili czasu” lub „chwili”
51	Pierwszy akapit	Moment, w którym dochodzi do przełączeń łączników w przekształtnikach energoelektronicznych, <u>zależy od właściwości fizycznych danej topologii</u> oraz zastosowanego algorytmu sterującego pracą tranzystorów – <i>jakie właściwości fizyczne ma topologia?</i>
118, 140, 141	rys.4.4, rys.4.16	Zrzut ekranu – żargon, raczej zdjęcie ekranu lub nawet „printscreen”
184	Prawy dolny róg strony	prawdopodobnie zamiast C_2 powinno być C_3
175 i inne		kondensatory przełączne czy przełączane - 6 razy przełączne, w tym w wykazie akronimów, pozostała większość pisana poprawnie

6. Wnioski

- Autor rozprawy wykazał się szeroką wiedzą z zakresu elektrotechniki, energoelektroniki, elektroniki oraz bardzo dobrym przygotowaniem do pracy badawczej i bardzo wysokimi umiejętnościami projektowymi i konstrukcyjno-technologicznymi.
- Uzyskane w rozprawie wyniki są znaczące i mogą być bardzo przydatne w zastosowaniach praktycznych oraz mają dużą wartość poznawczą.
- Drobne uwagi krytyczne przedstawione w recenzji nie podważają pozytywnej oceny końcowej recenzowanej rozprawy doktorskiej.

WNIOSEK KOŃCOWY

Uważam, że rozprawa doktorska Pana magistra inżyniera Szymona Folmera pt. „Wielopoziomowe przekształtniki DC-DC z tranzystorami z azotku galu GaN” stanowi samodzielne rozwiązanie ważnego i aktualnego zagadnienia naukowo-badawczego.

Rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z warunkami określonymi w artykule 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Marcin Kasprzak

