

Gdańsk, dnia 29.07.2025r.

dr hab. inż. Marek Turzyński, prof. PG
Politechnika Gdańska
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEiTK

Wpłynęło dnia 11.08.2025

Zarejestrowano pod nr 510-1-3/25

Podpis dm

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Szymona Folmera pt.
„Wielopoziomowe przekształtniki DC-DC z tranzystorami z azotku galu GaN”**

Podstawą recenzji jest uchwała nr 120/2025 r. Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo – Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 5 czerwca 2025 r. w sprawie wyznaczenia recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora mgr. inż. Szymonowi Folmerowi, zawiadomienie nr 27/2025 o wyznaczeniu Recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora oraz pismo nr L.Dz RD AEEiTK/310-1-2/25 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Przewodniczący Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH z informacją o powołaniu mnie na recenzenta wymienionej powyżej rozprawy doktorskiej.

1. Merytoryczna ocena pracy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Szymona Folmera pt. „Wielopoziomowe przekształtniki DC-DC z tranzystorami z azotku galu GaN” została napisana w języku polskim, liczy łącznie 267 stron i obejmuje sześć głównych rozdziałów, spis 118 pozycji bibliograficznych, dwa załączniki oraz oświadczenie Autora.

1.1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora?

Tematyka rozprawy koncentruje się wokół badań dotyczących wielopoziomowych przekształtników DC-DC z przełączanymi kondensatorami. Układy tego typu (ze szczególnym uwzględnieniem rozwiązań rezonansowych) stanowią dynamicznie rozwijającą się gałąź energoelektroniki i ze względu na możliwość wielokrotnego zwiększenia bądź obniżenia napięcia mogą znaleźć zastosowanie np. w mikrosystemach fotowoltaicznych lub systemach zasilania superkomputerów. Rosnąca popularność tego typu rozwiązań wynika z ich dużej gęstości mocy, relatywnie wysokiej sprawności czy też prostych metod sterowania. O wadze i aktualności zagadnienia świadczy rozbudowana i stale rosnąca liczba publikacji dotyczących rozpatrywanego tematu. Należy jednak podkreślić, iż dotychczas proponowane rozwiązania często obciążone są szeregiem istotnych ograniczeń wynikających z

konieczności zastosowania w konstrukcji przekształtników wielu łączników energoelektronicznych, co przekłada się na redukcję efektywności energetycznej i wysoki stopień skomplikowania. Dostrzegalne są również problemy wynikające z konieczności stosowania elementów indukcyjnych o dużych indukcyjnościach, wysokie wartości napięć oddziałujących na elementy półprzewodnikowe czy też ograniczona możliwość efektywnej regulacji napięcia wyjściowego w szerokim zakresie zmian obciążenia przekształtnika. W efekcie zagadnienia stanowiące istotę rozprawy należy uznać za istotne i aktualne.

W swojej rozprawie Autor rozpatruje autorską topologię wielopoziomowego przekształtnika HVGDCC (*ang. High Voltage Gain Direct Current Converter*) cechującą się sześciokrotnym wzmocnieniem napięciowym, możliwością siedmiostopniowej regulacji napięcia wyjściowego, zredukowaną liczbą zastosowanych tranzystorów, obniżonymi wartościami indukcyjności dławików czy też zredukowanymi (w porównaniu z innymi rozwiązaniami) wartościami napięć oddziałujących na elementy półprzewodnikowe. Za istotne należy również uznać dążenie Autora do podniesienia sprawności energetycznej rozpatrywanego układu poprzez zastosowanie w konstrukcji przekształtnika tranzystorów wykonanych w technologii azotku galu GaN, czy też adaptację technik miękkiego przełączania tranzystorów. W związku z powyższym Autor sformułował sześć głównych celów rozprawy obejmujących analizę aktualnego stanu wiedzy i techniki, opracowanie autorskiej topologii przekształtnika HVGDCC z miękkim przełączaniem tranzystorów (układ rezonansowy), wykonanie teoretycznej analizy sprawności układu, przeprowadzenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych przekształtnika dla konfiguracji z tranzystorami Si-MOSFET i GaN oraz wykazanie efektów wynikających z zastąpienia tranzystorów Si-MOSFET tranzystorami GaN. Oceniam, iż rozpatrywane w pracy zagadnienie naukowe jak i cele pracy zostały sformułowane jasno i poprawnie.

1.2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

Bibliografia obejmuje 118 pozycji. W zdecydowanej większości Autor odwołuje się do publikacji naukowych opublikowanych w ostatnim dziesięcioleciu (z bardzo znaczącym udziałem prac opublikowanych po roku 2020) w ramach konferencji naukowych i na łamach uznanych czasopism naukowych. Istotną część bibliografii (18 pozycji) stanowią odwołania do dokumentacji technicznych. Oceniam, iż analiza źródeł i aktualnego stanu wiedzy została przeprowadzona dogłębnie i wyczerpująco, co świadczy o właściwym rozpoznaniu tematu przez Autora.

1.3. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Rozprawa dotyczy zagadnień związanych z rozwojem przekształtników DC-DC z przełączanymi kondensatorami HVGDCC i miękką komutacją tranzystorów. W pierwszym etapie prac Autor dokonał przeglądu istniejących rozwiązań ze wskazaniem ich ograniczeń. Następnie wykonał analizę teoretyczną pracy układu ze wyróżnieniem sekwencji umożliwiających uzyskanie różnych wartości wzmocnienia napięciowego w zakresie od 1 do 6. W przyjętym rozwiązaniu tranzystory układu są głównie przełączane przy

zerowym prądzie (ZCS), niemniej jednak istnieje również możliwość przełączania wybranych tranzystorów w warunkach beznapięciowych (ZVS). W tym celu Autor zaadaptował powszechnie znane i szeroko stosowane rozwiązanie wykorzystujące przeładowanie pojemności wyjściowych komutowanych tranzystorów za pośrednictwem prądu o charakterze indukcyjnym (tzw. mechanizm komutacji z tranzystora na diodę). W przyjętym rozwiązaniu do kształtowania warunków ZVS Autor wykorzystał pojemności wyjściowe tranzystorów. Warto nadmienić, iż w niektórych rozwiązaniach pojemność C_{DS} tranzystorów jest sztucznie zwiększana poprzez aplikację dodatkowych kondensatorów pomiędzy drenem a źródłem tranzystorów, co umożliwia zachowanie beznapięciowych warunków przełączania w szerszym zakresie zmian prądu drenu.

W dalszej części swoich prac Autor przedstawił teoretyczną metodologię szacowania sprawności rozpatrywanego przekształtnika. W tym celu został wyprowadzony szereg zależności analitycznych uwzględniających straty mocy w elementach półprzewodnikowych, elementach indukcyjnych, kondensatorach itp. Na tym etapie prac Autor posłużył się powszechnie znanymi i szeroko stosowanymi zależnościami, aczkolwiek przyjął również szereg założeń upraszczających jak np. brak analizy strat w rdzeniach dławików rezonansowych, co Autor uzasadnia brakiem dostępu do odpowiedniej specyfikacji technicznej, czy też przeprowadzenie rozważań tylko dla przypadku, w którym wszystkie tranzystory przełączane są w warunkach ZCS (str. 57 i dalsze).

Następnie zgodnie z powszechnie przyjętymi regułami Autor dokonał doboru elementów dla eksperymentalnych układów prototypowych, przy czym maksymalny poziom mocy wyjściowej, dla której dokonano obliczeń ustalono na poziomie 1000W (str. 78). W ramach prac zostały opracowane dwie wersje układu tj. z tranzystorami Si-CoolMOS oraz GaN o zbliżonych parametrach eksploatacyjnych (rezystancja kanału, ciągły prąd drenu, efektywna energetyczna pojemność wyjściowa - str. 96, Tabela 2.11). W przypadku zastosowanych diod Autor wykorzystał dwa różne ich typy (str. 94) tj. IDW20G65C5B wykonane w technologii SiC dla układu z tranzystorami Si-CoolMOS oraz STTH30L06C dla układu z tranzystorami GaN. Należy zaznaczyć, iż są to diody o znacząco różnych wartościach spadku napięcia w stanie przewodzenia tj. 1,5V dla IDW20G65C5B vs. 0.95V dla STTH30L06C. Ponadto, oba porównywane przekształtniki eksperymentalne różnią się nie tylko rodzajem zastosowanych elementów półprzewodnikowych, ale też cechują się nieco odmiennymi konfiguracjami obwodów wejściowych i wyjściowych, wartościami operacyjnych częstotliwości pracy zarówno w trybie ZVS jak i ZCS czy też odmiennymi konfiguracjami obwodów PCB.

W dalszej części rozważań Autor przeprowadził badania symulacyjne rozpatrywanych konfiguracji przekształtnika z tranzystorami Si-CoolMOS oraz GaN celem weryfikacji właściwości operacyjnych oraz oszacowania strat mocy dla poszczególnych komponentów oraz wyznaczenia charakterystyk sprawności układów pracujących w trybie ZCS oraz ZVS. Do tego celu został wykorzystany symulator Matlab - Simulink, który jednak zdaniem Recenzenta nie jest najlepszym rozwiązaniem do symulacji procesów komutacyjnych elementów półprzewodnikowych. Niemniej jednak uzyskane rezultaty należy uznać za wartościowe i potwierdzające słuszność przyjętej koncepcji przekształtnika HVGDC.

Projekty układów eksperymentalnych zostały opracowane z zachowaniem właściwych procedur i narzędzi inżynierskich (wykorzystano oprogramowanie Altium Designer). Następnie przekształtniki zostały poddane badaniom eksperymentalnym. Autor dokonał odpowiedniej konfiguracji stanowiska laboratoryjnego, wykorzystana aparatura pomiarowa jest właściwa dla tego typu badań, rezultaty zaprezentowane są w sposób prawidłowy.

Oceniam, iż w rozpatrywanych aspektach pracy przyjęte założenia są słuszne i znajdują swoje uzasadnienie w rozważaniach Autora. Dobrane metody badawcze są poprawne. Założone cele rozprawy zostały osiągnięte, a postawione zagadnienie zostało rozwiązane. Przeprowadzone rozważania, wykonane prace i badania symulacyjne oraz eksperymentalne dowodzą umiejętności Autora w zakresie metodyki i metodologii prowadzenia badań naukowych oraz potwierdzają kwalifikacje Autora w zakresie samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uznaję także, iż Autor wykazał umiejętność poprawnego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników.

1.4. Na czym polega oryginalny dorobek Autora?

Oprócz rozprawy, wyniki prac Autora zostały opublikowane na łamach szeregu publikacji prezentowanych w ramach konferencji krajowych i międzynarodowych (SENE, PEMC) oraz czasopism o zasięgu międzynarodowym (IEEE Access, Energies). Łącznie Autor jest współautorem 15 takich publikacji. Ponadto Autor jest współautorem wniosku patentowego dotyczącego opisywanego w rozprawie przekształtnika. Na uwagę zasługuje także publikacja S. Folmer i R. Stala, „*DC-DC high voltage gain switched capacitor converter with multilevel output voltage and zero voltage switching*,” IEEE Access, vol. 9, pp. 129692–129705, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3111546 - 32 cytowania wg stanu publikowanego na stronie IEEE Xplore na dzień 15.07.2025, co świadczy o wysokiej wartości prac Autora, ich znaczeniu i szerokim odzewie w środowisku naukowym. W artykule tym część treści pokrywa się jednak z zawartością recenzowanej rozprawy doktorskiej, stąd **wskazane jest, by w odniesieniu do publikacji współautorskich oraz wniosku patentowego dołączyć oświadczenia współautora/-ów o wkładzie merytorycznym i tym samym jednoznacznie wskazać osobisty wkład Autora rozprawy.**

Na podstawie przygotowanej rozprawy, jako osobisty i oryginalny dorobek Autora należy wymienić:

- opracowanie autorskiej topologii przekształtnika HVGDC z kondensatorami przełączanymi i miękką komutacją tranzystorów układu,
- szeroka analiza opracowanej topologii obejmująca analizę teoretyczną oraz badania symulacyjne ze szczególnym uwzględnieniem sprawności energetycznej,
- opracowanie strategii sterowania rozpatrywanego układu oraz adaptacja metod miękkiego przełączania tranzystorów ZVS oraz ZCS.
- opracowanie i wykonanie projektów eksperymentalnych przekształtników HVGDC w konfiguracji z tranzystorami Si-CoolMOS i GaN wraz z układami pomocniczymi i sterowania,

- przeprowadzenie badań eksperymentalnych wykonanych prototypów przekształtników HVGDCC i ich analiza porównawcza.

Należy podkreślić bardzo szeroki zakres zrealizowanych prac oraz szerokie wykorzystanie przez Autora różnorodnych narzędzi i metod badawczych, wysoki poziom proponowanych rozwiązań technicznych (szczególnie w odniesieniu do układów przekształtnikowych zbudowanych z wykorzystaniem elementów półprzewodnikowych wykonanych w technologii GaN), wysoki poziom innowacyjności oraz kultury technicznej. Wkład Autora do aktualnego stanu wiedzy i rozwoju przekształtników DC – DC typu HVGDCC oraz układów z łącznikami GaN należy ocenić jako znaczący. W świetle powyższego oceniam, iż przedstawione osiągnięcia w pełni spełniają wymagania stawiane w ramach przewodu doktorskiego.

1.5. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżyniersko – technicznych?

Tematyka rozprawy odpowiada aktualnym kierunkom rozwoju energoelektroniki i układów przekształtnikowych. Rozprawa Autora stanowi uzupełnienie aktualnego stanu wiedzy i może stanowić przyczynek do dalszych prac nad rozwojem wielopoziomowych przekształtników HVGDCC. Opisane rozwiązanie może stanowić atrakcyjną alternatywę dla innych rozwiązań tego typu, a wyniki badań porównawczych układów z łącznikami GaN i Si-CoolMOS potwierdzają możliwość praktycznego podniesienia efektywności energetycznej przekształtnika poprzez zastosowanie komponentów wykonanych w technologii GaN, co sprzyja dalszemu upowszechnianiu tego typu łączników.

1.6. Ocena merytoryczna pracy.

Biorąc pod uwagę składowe oceny przedstawione w punktach 1.1 – 1.5 stwierdzam, iż pod względem merytorycznym ocena rozprawy jest pozytywna.

2. Struktura rozprawy i uwagi.

Rozprawa napisana jest w języku polskim składa się z sześciu głównych rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim, *"Spisem treści"* oraz *"Wykazem ważniejszych oznaczeń"*. W pierwszym akapicie *Streszczenia* Autor odnosi się do rezonansowych przekształtników DC-DC i jednocześnie w tym samym akapicie stwierdza, że *„Ponadto, dzięki wyeliminowaniu elementów indukcyjnych z procesu przekształcania energii, układy te charakteryzują się, kompaktowymi wymiarami, niewielką masą, oraz możliwością pracy w szerokim zakresie temperatur otoczenia”*, co może wprowadzać w błąd, gdyż w układach rezonansowych obecność elementów o charakterze indukcyjnym jest niezbędna do wzbudzenia procesu rezonansowego. Z punktu widzenia czytelnika w odniesieniu do przedstawionego *„Wykazu akronimów”* bardziej właściwe jest zestawienie ważniejszych oznaczeń w kolejności alfabetycznej. Ponadto wykaz ważniejszych oznaczeń powinien być zdecydowanie bardziej rozbudowany.

W rozdziale 1 Autor dokonuje wprowadzenia do tematyki rozprawy. Przedstawia rys historyczny, formułuje tezę oraz opisuje aktualny stan wiedzy dotyczący przekształtników z przełączalnymi kondensatorami. W tej części pracy można dostrzec liczne błędy interpunkcyjne, które często występują również w dalszych rozdziałach. Pojawiają się także

wrażenia zaczerpnięte z języka potocznego jak np. na str. 1 „Ciężko sobie bowiem wyobrazić”. Warto podkreślić, iż zdaniem prof. ucz. dr hab. Katarzyny Kłosińskiej z Uniwersytetu Warszawskiego cyt. „*Takie użycia sytuują się na granicy akceptowalności, i to tylko w wypowiedziach potocznych, natomiast nie są do zaakceptowania w tekstach oficjalnych.*”

Oprócz przeglądu rozwiązań opisanych w literaturze przedmiotu, w rozdziale 1 Autor wskazuje również na aspekty związane z rozwojem i zastosowaniem elementów półprzewodnikowych wykonanych w materiałach półprzewodnikowych charakteryzujących się szerokim pasmem zabronionym – głównie z wykorzystaniem azotku galu GaN oraz węgla krzemu SiC.

Przedstawiona teza pracy jest rozbudowana (w formie 1 zdania) i obejmuje dwa zagadnienia tj. możliwość budowy przekształtnika DC-DC z przełączalnymi kondensatorami, wielopoziomowym wzmocnieniu napięcia i przełączaniem części tranzystorów w warunkach ZVS oraz możliwość redukcji prądów związanych z przeładowaniem pojemności wyjściowych tranzystora poprzez wykorzystanie elementów półprzewodnikowych wykonanych w technologii GaN. W rezultacie być może bardziej właściwe byłoby przedstawienie tezy w formie dwóch odrębnych zdań. Na zakończenie rozdziału 1 Autor omawia cele pracy oraz opisuje strukturę rozprawy.

W ramach rozdziału 2 Autor przedstawia opis autorskiego układu HVGDC. Dokonuje porównania układu będącego przedmiotem rozprawy (a opisanego również w publikacji [22] i będącego przedmiotem złożonego wniosku patentowego), wskazując na istotne zalety proponowanego rozwiązania jak np. zredukowana liczba tranzystorów, możliwość regulacji napięcia wyjściowego, obniżona (w stosunku do innych układów) wartość maksymalna napięć oddziałujących na elementy półprzewodnikowe. W dalszej części rozdziału 2 Autor opisuje zasadę działania rozpatrywanego przekształtnika. W przypadku prezentacji schematów prezentujących drogę przepływu prądu w poszczególnych stanach pracy układu (np. rys.2.3 i kolejne), Autor pominął oznaczenie poszczególnych diod i tranzystorów (zgodnie z rys. 2.1), co utrudnia odbiór opisywanych zagadnień, tym bardziej iż Autor odnosi się do tych oznaczeń w tekście pracy. W dalszej części rozdziału 2 Autor przedstawia zależności analityczne opisujące zasadę działania przekształtnika oraz wykazuje teoretyczną możliwość siedmiostopniowej skokowej regulacji napięcia wyjściowego. Rozpatrując ten aspekt pracy nasuwa się pytanie, czy w przypadku rozpatrywanej topologii rysuje się możliwość płynnej regulacji napięcia wyjściowego (np. w celu stabilizacji napięcia wyjściowego przy zmianach obciążenia) poprzez wprowadzenie dodatkowego stanu wskazanego na rys.2.6 np. pomiędzy stan M2 i M3 oraz M2 i M4? Ważny aspekt pracy stanowi analiza możliwości przełączania wybranych tranzystorów układu (Q_1 oraz Q_3) w warunkach beznapięciowych ZVS. W tym celu Autor zaadaptował powszechnie znane rozwiązanie polegające na wykorzystaniu przeładowania pojemności wyjściowych tranzystorów i włączeniu tranzystora w podokresie, gdy przewodzi jego dioda antyrównoległa (w pracy Autor używa określenia *dioda podłożowa*). Zgodnie z opisaną ideą, przełączanie w warunkach ZVS ma ograniczyć straty związane z przeładowaniem wyjściowych pojemności pasożytniczych tranzystorów.

W kolejnej części rozdziału 2 Autor wyprowadza zależności analityczne służące wyznaczeniu teoretycznych charakterystyk sprawności opisywanego układu. Należy zauważyć, iż Autor na tym etapie prac przyjął szereg wskazanych już w recenzji założeń upraszczających, które w efekcie mogą przekładać się na dokładność uzyskiwanych rezultatów. Ważną część rozdziału 2 stanowi kompleksowy opis doboru elementów układu. W toku zrealizowanych prac ostatecznie powstały dwie różne konfiguracje układów eksperymentalnych tj. z krzemowymi tranzystorami Si-CoolMOS i diodami SiC oraz z tranzystorami i diodami wykonanymi w technologii GaN.

W rozdziale 3 w oparciu o wyprowadzone zależności analityczne Autor rozpatruje straty mocy poszczególnych komponentów składowych przekształtnika dla konfiguracji HVGDCC z tranzystorami GaN i Si-CoolMOS przełączanymi w warunkach ZCS i przedstawia teoretyczne charakterystyki sprawności energetycznej analizowanego przekształtnika. W toku lektury rozdziału 3 pojawia się jednak pytanie o sposób estymacji strat związanych z przeładowaniem pasożytniczych pojemności C_{oss} – czy wykorzystano w tym celu zależności (2.21) oraz (2.22)? Przedstawiony w rozdziale 3 opis rozwiązania tego zagadnienia jest niejasny. Przy prezentacji charakterystyk strat mocy tranzystorów dostrzegalny jest brak rozróżnienia na straty przewodzenia i straty komutacyjne (wynikające z przeładowania pojemności C_{oss} przy przełączaniu w warunkach ZCS). Należy zaznaczyć, że analizy zostały przeprowadzone jedynie dla przypadku przełączania tranzystorów w warunkach ZCS. Co prawda Autor deklaruje, że w ramach dalszych kierunków badań zostanie opracowany model analityczny do wyznaczenia sprawności przekształtnika z tranzystorami przełączanymi w warunkach ZVS, aczkolwiek już na obecnym etapie taka analiza stanowiłaby cenne uzupełnienie recenzowanej rozprawy.

W rozdziale 4 Autor przedstawia wyniki badań symulacyjnych układów z tranzystorami Si-CoolMOS i GaN przełączanymi w warunkach ZVS i ZCS. Modele symulacyjne zostały przygotowane w środowisku Matlab-Simulink. W rozważaniach przyjęto uproszczone modele ścieżek PCB, elementów indukcyjnych i kondensatorów. W przypadku modelu tranzystora Si-CoolMOS wykorzystano model tego elementu zaimplementowany w bibliotece Simscape Electrical. Ze względu na brak modelu bibliotecznego, na potrzeby opracowania modelu tranzystora GaN Autor dokonał modyfikacji istniejącego bibliotecznego modelu tranzystora N-MOSFET. W dalszej części rozdziału 4 zostały przedstawione wyniki przeprowadzonych badań. W pierwszej kolejności Autor dokonał weryfikacji przyjętej koncepcji przekształtnika, potwierdził przyjętą zasadę działania układu oraz poddał analizie przebiegi operacyjne. Niemniej jednak zdaniem Recenzenta, dla przedstawionych przebiegów przejście układu ze stanu M3 do stanu M1 nie odbywa się w warunkach ZCS. Np. na rys.4.12 w chwilach $t = 7.925\text{ms}$ oraz $t = 7.95\text{ms}$ (i analogicznie na rys.4.8), przejście do nowego stanu odbywa się przy niezerowym prądzie i_{in} , co skutkuje np. pojawieniem się przepięć w przebiegu napięcia diody D_1 . Brak wyłączenia tranzystorów w warunkach ZCS jest również dostrzegalny w przebiegach zaprezentowanych na rys. 4.10. Zastanawiające jest, że w przebiegach zaprezentowanych na rys. 4.15 obrazujących przełączanie tranzystorów w warunkach ZVS nie dostrzega się fazy przeładowania pojemności wyjściowych tranzystorów, co powinno skutkować zredukowaną wartością pochodnej du/dt napięć u_{DS} tranzystorów – np. na rys. 4.15a dostrzec można gwałtowną zmianę wartości napięć u_{Q1} oraz u_{Q3} w chwili

$t = 7.9298\text{ms}$ z wartością du/dt dążącą do nieskończoności i natychmiastowym przejściem przewodzenia prądu i_{Q1} przez diodę antyrównoległą, co stoi w sprzeczności z opisem zamieszczonym w podrozdziale 2.5 rozprawy. Jako wartościowe należy uznać analizę uzyskanych charakterystyk sprawności oraz przedstawiony rozkład strat mocy dla poszczególnych elementów półprzewodnikowych przekształtników w konfiguracji z tranzystorami Si-CoolMOS i GaN oraz przełączanych w warunkach ZCS i ZVS. Niemniej jednak, podobnie jak w przypadku wyników zaprezentowanych w rozdziale 3, w odniesieniu do analizy strat dla poszczególnych tranzystorów dostrzegalny jest również brak rozróżnienia na straty przewodzenia i straty komutacyjne (wynikające z przeładowania pojemności C_{oss} przy przełączaniu w warunkach ZCS). Ponadto w toku całej rozprawy Autor używa określenia „ilość strat”. Zdaniem Recenzenta w tym przypadku bardziej właściwe byłoby użycie określenia „wielkość strat”. Dodatkowo, dość często w pracy najpierw pojawiają się rysunki, a dopiero później następuje odniesienie do nich w tekście rozprawy, co stoi w sprzeczności z powszechnie przyjętą praktyką.

Główną część rozdziału 5 stanowi prezentacja i omówienie wyników kompleksowych badań eksperymentalnych układów prototypowych obejmujące pomiary oscyloskopowe, badania z wykorzystaniem kamery termowizyjnej i pomiary charakterystyk sprawności przekształtników. Wysoką wartość tej części pracy podnosi szczegółowy opis projektu obu układów oraz zamieszczone liczne oscylogramy zarejestrowane w trakcie pomiarów eksperymentalnych. W ramach rozdziału Autor szczegółowo omawia uzyskane przebiegi eksperymentalne prądów i napięć zmierzone dla różnych komponentów układów i wykazuje, iż zastosowanie tranzystorów wykonanych w technologii GaN sprzyja redukcji prądów wynikających z przeładowania pojemności wyjściowych łączników, a tym samym udowadnia drugą część tezy. Ważny i cenny wkład stanowi analiza mechanizmów związanych z komutacją tranzystorów i generacją prądów o charakterze impulsowym przeładowujących pojemności wyjściowe tranzystorów, co skutkuje wystąpieniem niepożądanych dodatkowych impulsów prądu o dużej wartości w przebiegu prądu wejściowego i_{in} . Ponieważ wybrane tranzystory w analizowanych przekształtnikach przełączane mogą być zarówno w warunkach ZVS jak i ZCS, należy uznać iż badania pod kątem emisyjności układów i generacji zaburzeń w zależności od mechanizmu komutacji byłyby cennym uzupełnieniem pracy. Przeprowadzenie podstawowych badań w tym kierunku wymaga jedynie dostępu do aparatury pomiarowej (oscyloskop, sondy pomiarowe), do której Autor niewątpliwie miał dostęp. Niestety Autor zadeklarował, iż badania te wykraczają poza zakres rozprawy, co zdaniem Recenzenta jest kwestią dyskusyjną, tym bardziej, że Autor nie przewiduje również przeprowadzenia takich pomiarów w ramach przyszłych prac (rozdział 6.2). W toku lektury rozdziału 5 pojawia się również pytanie, dlaczego badania termowizyjne zostały przeprowadzone jedynie dla układu z tranzystorami GaN? Ponadto, czy Autor weryfikował pracę układów dla obciążenia odpowiadającego deklarowanej na str. 78 rozprawy mocy maksymalnej wynoszącej 1kW oraz w stanach dynamicznych (tj. np. przy zmianach obciążenia)? W przypadku części oscylogramów przedstawiających przebiegi prądów poziom znacznika zera na ekranie oscyloskopu nie pokrywa się z poziomem zerowym przebiegu – np. prąd mierzony w kanale CH3 zobrazowany na rys.5.34.

Rozdział 6 stanowi podsumowanie treści rozprawy wraz z propozycją kierunków dalszych prac i wnioskami końcowymi. Dodatkowo w ramach tego rozdziału Autor wykazuje samodzielne osiągnięcia oraz przedstawia listę publikacji, których jest współautorem.

Rozprawa napisana jest starannie, rysunki są przejrzyste, wywód jest klarowny. Oceniam, że struktura rozprawy jest poprawna i spełnia kryteria stawiane rozprawom doktorskim.

3. Komentarze i uwagi szczegółowe.

Proszę o stosowny komentarz Autora do prezentowanych poniżej uwag i pytań.

1. W rozdziale 5 Autor przedstawia kompleksowe oscylogramy prezentujące przebiegi prądów i napięć poszczególnych tranzystorów. W związku z powyższym nasuwa się pytanie o próbę wyznaczenia strat poszczególnych tranzystorów układu metodą pomiarów oscyloskopowych i skonfrontowanie tych wyników z rezultatami symulacji i obliczeń analitycznych.
2. Proszę przedstawić i omówić wyniki badań prezentowanego przekształtnika HVGDCC obrazujące zachowanie się układu w stanach dynamicznych np. przy zmianach obciążenia oraz w stanie rozruchu układu.
3. Proszę przedstawić szacunkową wartość strat wynikających z przeładowania pasożytniczych pojemności wyjściowych tranzystorów przekształtnika przełączanych w warunkach ZCS dla łączników typu Si-CoolMOS oraz GaN.
4. Zastanawiające są znaczące rozbieżności pomiędzy eksperymentalnymi charakterystykami sprawności przekształtników a ich symulacyjnymi i analitycznymi odpowiednikami. W związku z powyższym w przypadku charakterystyk uzyskanych metodami symulacyjnymi nasuwa się pytanie o weryfikację zastosowanych modeli diod i tranzystorów pod kątem ich dokładności w symulacji stanów statycznych i dynamicznych.
5. Proszę przedstawić wyniki badań i analiz uzasadniających punkt 5 oraz punkt 6 przedstawione we wnioskach końcowych pracy tj. dotyczących zmian parametrów kondensatorów ceramicznych i dławików. W jakim zakresie obserwowana jest zmiana tych parametrów i jak ostatecznie wpływa to na pracę przekształtnika?
6. Na rys.4.20 przedstawiono zestawienie strat poszczególnych łączników układu. Proszę uzasadnić znaczący wzrost wartości strat tranzystorów Q_4 i Q_5 typu Si-CoolMOS dla przełączania w warunkach ZVS w stosunku do przełączania w warunkach ZCS (przy obydwu wartościach mocy obciążenia). Jednocześnie w przypadku tych samych łączników wykonanych w technologii GaN straty te pozostają na praktycznie tym samym poziomie niezależnie od trybu komutacji.

7. W rozpatrywanych konfiguracjach przekształtników Autor zastosował tranzystory Si-CoolMOS i GaN o zbliżonych parametrach (Tabela 2.11), tj. rezystancji kanału, efektywnej wyjściowej pojemności energetycznej $C_{o(er)}$ i podobnych wartościach pojemności wyjściowej C_{oss} (Rys. 2.21). W związku z powyższym straty przewodzenia dla obu typów tranzystorów powinny być zbliżone. Podobnie, zgodnie z zależnościami (2.21) oraz (2.22), również straty łączeniowe związane z przeładowaniem pojemności wyjściowej C_{oss} powinny być w obu przypadkach zbliżone, gdyż przy podobnych wartościach częstotliwości przełączeń i napięcia U_{DS} , wielkość tych strat zależy od efektywnej wyjściowej pojemności energetycznej $C_{o(er)}$. Zgodnie z powyższym straty te powinny w niewielkim stopniu wpływać na całkowite straty tranzystorów i charakterystyki sprawności, co można dostrzec na rys. 3.5a. W rezultacie przyrost sprawności dla układu z tranzystorami GaN nie wynikałby z zastosowania tranzystorów GaN, lecz z zastosowania w tym przypadku diod STTH30L06C o znacząco obniżonym spadku napięcia w stanie przewodzenia (rys. 3.5, Tabela 2.9). Proszę o komentarz i odniesienie się do uzyskanych wyników przeprowadzonych badań symulacyjnych i eksperymentalnych.
8. W nawiązaniu do punktu 7 „Komentarzy i uwag szczegółowych” niniejszej recenzji, nasuwa się pytanie o kształt charakterystyk sprawności przekształtników w konfiguracji z tranzystorami Si-CoolMOS i diodami STTH30L06C oraz tranzystorami GaN i diodami IDW20G65C5B.
9. W przypadku przebiegów zaprezentowanych na rys. 5.34, 5.35, 5.48, 5.49 zastanawiające jest występowanie przepięcia o znacznej wartości w przebiegu napięcia dren – źródło tranzystora Q_1 . Należy zauważyć, iż prąd drenu tego łącznika opada do zera jeszcze przed zmianą napięcia sterującego bramka – źródło – przełączanie następuje w warunkach ZCS. Proszę wyjaśnić mechanizm generacji tego przepięcia obserwowanego zarówno dla układów z tranzystorami Si-CoolMOS jak i GaN.
10. W nawiązaniu do przebiegów przedstawionych na rys. 5.54 warto zauważyć, iż tranzystor Q_3 jest w tym przypadku wyłączany w warunkach twardych. Zjawisko to można również dostrzec w przebiegach zamieszczonych na rys. 5.39 obrazujących przebieg prądu tego tranzystora dla konfiguracji przekształtnika z tranzystorami Si-CoolMOS. Czy Autor podjął się próby oszacowania strat wynikających z przełączania tranzystora Q_3 w warunkach twardych i ich wpływu na ogólną charakterystykę sprawności przekształtnika? Jaka jest relacja tych strat w odniesieniu do strat wynikających z przeładowania pojemności wyjściowej tranzystora przełączanego w warunkach ZCS?

4. Podsumowanie i wniosek końcowy.

Tematyka pracy w pełni odpowiada zakresowi tematycznemu dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Ocena rozprawy jest pozytywna. Stwierdzam, iż cele pracy zostały zrealizowane a teza udowodniona.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20.07.2018, Dz.U.2024, poz.1571 z późn. zmianami w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne i wnoszę o jej dopuszczenie do dalszego procedowania.

Marek Turzyński

