Warszawa, 10.02.2017

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 ŚLĄSKIEJ

Tytuł rozprawy:

Analiza wysokoczęstotliwościowych drajwerów tranzystorów MOSFET mocy stosowanych w falownikach rezonansowych.

Autor rozprawy: **mgr inż. Piotr Legutko**

1. Wstęp. Tematyka rozprawy.

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Legutko poświęcona jest zagadnieniom sterowników bramkowych (określanych przez Autora drajwerami) dla tranzystorów mocy typu MOSFET przeznaczonych do pracy w falownikach rezonansowych cechujących się wysokimi częstotliwościami przełączeń. W tym przypadku autor skupiał się na układach małej mocy działających w zakresie 10 do 30 MHz, a konkretnie na falowniku klasy E, który może być stosowany przede wszystkim w grzejnictwie indukcyjnym oraz bezprzewodowym przesyle energii. Ponieważ straty sterowania w takich układach, które pracują w warunkach miękkiego przełączania, stanowią istotną część całkowitych strat mocy podjęta tematyka prac badawczych wydaje się być ważna, aktualna oraz zgodna z obecnymi tendencjami obserwowanymi w energoelektronice prowadzącymi do miniaturyzacji urządzeń poprzez podnoszenie częstotliwości przełączania. Co więcej, część dorobku Autora może być wykorzystana w innych obszarach energoelektroniki, np. do opracowania obwodów sterowania szybkimi elementami półprzewodnikowymi zbudowanymi na bazie węglika krzemu lub azotku galu.

Obok szerokiego spektrum ośrodków światowych aktywnych w tym obszarze należy odnotować prace krajowych ośrodków badawczych, by wymienić tylko prace prowadzone na Politechnice Białostockiej, Akademii Górniczo-Hutniczej, Politechnice Warszawskiej czy wreszcie przez grupę badaczy z Politechniki Śląskiej, z której wywodzi się autor. Grupa ta wykazywała aktywność w obszarze sterowników bramkowych, o czym świadczy szereg publikacji a praca Autora jest wyraźną kontynuacją tej tematyki. W świetle niezadawalających parametrów komercyjnie dostępnych sterowników bramkowych dedykowanych dla

falowników rezonansowych Autor postawił sobie za cel opracowanie i przebadanie kompaktowego sterownika bramkowego pracującego w zakresie częstotliwości do 30 MHz, który będzie złożony z elementów dyskretnych małej mocy i będzie się cechować lepszymi parametrami energetycznymi i podobnymi parametrami dynamicznymi w porównaniu do rozwiązań komercyjnych. W mojej ocenie cel i teza rozprawy są jednoznaczne a oryginalność tematyki polega na zaproponowaniu nowych sposobów realizacji sterowników bramkowych. Wypełnienie luki merytorycznej w obecnym stanie wiedzy w tym zakresie należy uznać za istotną i uzasadnioną motywację podjęcia tematu. Należy podkreślić jeszcze raz, że cel pracy jest niezmiernie aktualny i bardzo ważny z punktu widzenia wartości aplikacyjnych jak i poznawczych.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Licząca 145 stron rozprawa składa się z dosyć dużej liczby bo aż 11 rozdziałów, bibliografii , zestawienia ważniejszych oznaczeń, zestawu podstawowych określeń i terminów, wykazu użytej aparatury, dodatków zawierających wybrane charakterystyki mocy i sprawności sterowników bramkowych oraz opis wykonania cienkich połączeń drutowych oraz dorobku naukowego Autora.

Rozdział pierwszy – wprowadzenie zawiera w zasadzie streszczenie pracy a klasyczne wprowadzenie znajduje się w rozdziale drugim, nic nie stało na przeszkodzie aby te rozdziały połączyć. Autor wstępnie szkicuje stan wiedzy i motywację do podjęcia danej tematyki badawczej a następnie przedstawia cel rozprawy oraz stawia tezę. W dalszej kolejności omawia sposób osiągnięcia celu i udowodnienia tezy, czyli kolejne zadania badawcze, co niestety przeradza się w spis treści (bo czy opis parametrów MOSFETa czy opis technologii połączeń drutowych to zadania badawcze?). Następnie Autor przedstawia szczegółowe założenia (podrozdział 2.3) i strukturę rozprawy (podrozdział 2.4), będącą poszerzonym spisem treści. W sumie na pierwszych 11 stronach autorowi udaje się aż trzy razy powtórzyć omówienie zawartości pracy.

Rozdział trzeci to niemal pięciostronicowy przegląd literatury, który świadczy o znajomości większości prac związanych z tematyką sterowników bramkowych. Autor omawia szereg publikacji odnoszących się do treści rozprawy, w tym sterowników rezonansowych oraz twardo przełączalnych, wykazując się dobrym rozeznaniem w tematyce. Ponadto, odnosi się do aktualnych prac dotyczących sterowników dla tranzystorów SiC i GaN, których rozprawa jednak nie dotyczy. Recenzent zadał sobie trud wpisania w bazie IEEE Explore hasła „MHz gate driver" i (przy ograniczeniu do 2015 roku) już na pierwszej stronie na 25 wyników znalazł kilka prac dotyczących tematyki rozprawy, których nie ma w spisie literatury. Oczywiście przy obecnej ilości artykułów nikt nie jest w stanie znać wszystkich powstających prac, ale może wysiłek skierowany na pozycje luźno związane z tematyką rozprawy warto było wykorzystać na dokładniejsze studium literatury dotyczące sterowników bramkowych pracujących przy wysokich częstotliwościach. W efekcie można odnieść wrażenie, że Autor może się jakoś odnosić jedynie do prac własnego zespołu i rozwiązań komercyjnych.

Rozdział czwarty nosi tytuł „Tranzystory MOSFET" i faktycznie autor przedstawia podstawowe, podręcznikowe informacje dotyczące tych tranzystorów oraz omawia poszczególne ich parametry. Zawartość rozdziału jest na ogół poprawna, brakuje jedynie wyraźnego zaznaczenia, że Autor skupia się na tranzystorach MOSFET wykonanych z krzemu i przeznaczonych do pracy przy częstotliwościach megahercowych. W podrozdziale 4.2.4 pojawia się zagadnienie sterownika bramkowego a w 4.2.5 procesy łączeniowe a następnie zagadnienia związane z indukcyjnością obwodu bramkowego i jego zachowania się przy

częstotliwościach liczonych w MHz. Nieoczekiwanie Autor omawia też charakterystyki strat sterownika bramkowego (rys. 4.16 i 4.17) by wrócić w podrozdziale 4.3 do wyboru tranzystora MOSFET do falownika rezonansowego. Wydaje się, że struktura rozdziału nie została do końca przemyślana, ponieważ to kolejny rozdział 5 nosi tytuł „Drajwery tranzystorów MOSFET". Ponadto można natknąć się na nie do końca trafne sformułowania, co zostało poruszone w dalszej części recenzji (w p. 3).

W rozdziale 5 Autor sprecyzował wymagania wobec sterowników bramkowych pracujących przy wysokich częstotliwościach a następnie omówił dwa rodzaje takich układów: klasyczny układ „totem-pole" oraz jedną z wersji sterownika rezonansowego. W dużej mierze rozważania tu zawarte dotyczą strat mocy i rozdział kończy charakterystyka stosunku sprawności dwóch typów sterowników, z której wynika, że układ rezonansowy powinien być co najmniej 2,5 krotnie mniej stratny (rys. 5.). Dosyć nieoczekiwanie Autor przedstawia w podsumowaniu zestawienie wyników obliczeń i pomiarów eksperymentalnych dla jednego z komercyjnych sterowników bramkowych.

Rozdział 6 zatytułowany jest „Realizacja drajwerów" i zawiera pobieżny opis czterech układów dostępnych na rynku oraz ośmiu sterowników dyskretnych zaprojektowanych przez Autora, w tym dwóch w wersji rezonansowej. Tę część rozprawy czyta się z zainteresowanie ale istotnym zastrzeżeniem do zawartości rozdziału 6 jest brak jasnego określenia kryterium doboru parametrów poszczególnych układów – Autor w zasadzie ograniczył się tylko do podania typu tranzystora, którego bramką będą one sterować. Zestawienie parametrów w tabeli 6 to zdecydowanie zbyt mało. Ponadto przedstawione schematy są raczej poglądowe – na zdjęciach widać więcej elementów montowanych powierzchniowo. Co więcej w większości przypadków nie podano jaka jest pojemność kondensatora w zasilaniu układu. W efekcie weryfikacja pracy autora przez innych badaczy wydaje się dosyć utrudniona. Autor omawia aspekty termiczne ale warto by w tym rozdziale skomentować także sposób projektowania obwodów drukowanych: konwencję rozłożenia elementów czy prowadzenia ścieżek sygnałowych oraz silnoprądowych.

Omówione w rozdziale 6 sterowniki zostały wszechstronnie przebadane w rozdziale 7, który jest najbardziej obszerny (42 strony) i zawiera kluczowe osiągnięcie rozprawy. W pierwszym kroku badane są straty mocy w sterownikach w stanach jałowych, obciążenia kondensatorem niskoindukcyjnym i wreszcie docelowym tranzystorem MOSFET. Dodatkowo dokonywane były pomiary termowizyjne. Następnie Autor dokonał precyzyjnych pomiarów właściwości dynamicznych wszystkich badanych sterowników. Co prawda część interpretacji wyników jest dyskusyjna, o czym w dalszej części recenzji, ale pomiary zostały wykonane zgodnie z wszelkimi zasadami i dały podstawę do określenia najbardziej perspektywicznego rozwiązania.

Rozdział ósmy zawiera opis i wyniki modelowania termicznego jednego z rozwiązań sterowników bramkowych w specjalistycznym oprogramowaniu. Oczywiście świadczy to o biegłości Autora w tym obszarze, jednak z punktu widzenia samego celu rozprawy rozdział ten nie wnosi nic nowego. Sterownik został zamodelowany i z pewną dokładnością uzyskano wyniki zbliżone do pomiarów kamerą termowizyjną. Natomiast treść rozdziału nie wskazuje na to, że przeprowadzone modelowanie w jakikolwiek sposób pomogło w poprawieniu sprawności czy właściwości dynamicznych badanego rozwiązania.

Kolejny rozdział 9 poświęcony jest omówieniu budowy i testom usprawnionej wersji jednego ze sterowników, określanej jako „drajwer hybrydowy". Oczywiście wersja ta jest zdecydowanie bardziej solidnie wykonana, zawiera także połączenia wykonane w technice połączeń drutowych i może być umieszczona w dedykowanej, mniejszej obudowie ale Autor

chyba zbyt mocno sugeruje, że jest to jakaś nowa jakość w porównaniu z odpowiednikiem omówionym w rozdziale 6. Zamieszczone w tym samym rozdziale wyniki badań wskazują, że różnice we właściwościach nie są znaczące.

Wreszcie w rozdziale 10 opracowany sterownik zostaje zastosowany w falowniku rezonansowym klasy E o mocy 300W. Co prawda Autor zupełnie zbędnie uzasadnia wybór tej klasy falownika w podrozdziale 10.1, ale pozostałą zawartość rozdziału należy ocenić bardzo wysoko. Uzyskane wyniki są istotnym osiągnięciem Autora i w zasadzie stanowią ostateczne potwierdzenie postawionej tezy przy pomocy eksperymentu, co w energoelektronice jest nie do przecenienia. Na koniec rozdziału pewien niedosyt pozostawia tylko brak testów dla dowolnego typu sterownika komercyjnego, co skazuje Autora na spekulacje, że uzyskane wyniki byłyby gorsze.

Rozdział 11 zawiera podsumowanie i wnioski. Autor podsumowuje zawartość rozprawy, przedstawia wnioski – nieco rozszerzone w stosunku do wniosków zawartych w poszczególnych rozdziałach. Omawia także osiągnięcia własne.

Spis literatury obejmuje zasadniczo 72 pozycje, spośród których większość została opublikowane w bieżącym stuleciu, co świadczy o aktualności zagadnień poruszanych w rozprawie. W większości przypadków są to publikacje w czasopismach lub konferencyjne w języku angielskim, choć Autor odwołuje się także do szeregu prac i podręczników autorów krajowych. Do tego należy doliczyć 27 not aplikacyjnych oraz 9 źródeł internetowych. Dobór literatury, jak i miejsca odwołań się do niej należy uznać za prawidłowe, choć niezręcznością jest cytowanie raportu z projektu badawczego NCN, który nie jest dostępny w publicznym obiegu. Spis literatury jest uzupełniony wykazem 6 publikacji autorstwa mgra inż. Piotra Legutko, z czego cztery są artykułami w krajowych czasopismach a pozostałe referatami konferencyjnymi.

Ponadto w pracy znajduje się wykaz użytej aparatury oraz dodatki: dwie charakterystyki sprawności aproksymowane wielomianami wyższego stopnia oraz opis sposobu wykonania cienkich połączeń drutowych. Rozprawę kończy zestawienie dorobku naukowego kandydata.

Układ redakcyjny pracy jest na ogół prawidłowy, sekwencja tematyki – omówienie tranzystorów, sterowników a następnie ich realizacji i prowadzonych badania - jest poprawna. W moim przekonaniu trochę utrudnia czytanie pomieszanie tematyki w rozdziałach 4 i 5, najlepiej byłoby je połączyć i usystematyzować. Dyskusyjne wydaje się być także umieszczenie między rozdziałami 7 i 9 rozdziału 8, który w mojej ocenie raczej spełnia standardy załącznika (razem z omówieniem metody połączeń drutowych).

Praca jest zredagowana w sposób czytelny i przejrzysty, szata graficzna pracy jest na wysokim poziomie, rysunki są czytelne i poprawnie opisane. Pracę otwiera zestaw oznaczeń i zestaw podstawowych definicji. Oczywiście Autor nie ustrzegł się kilku drobnych niedociągnięć redakcyjnych, które zestawione są w punkcie 3 tej recenzji. W kwestii nazewnictwa brakuje konsekwencji. Skoro decydujemy się spolszczyć i używać terminu „drajwer", to niezrozumiałe jest posługiwanie się angielskimi terminami „Wire Bonding", „thermal clad" czy „przetwornica BUCK", które mają polskie odpowiedniki.

3. Uwagi ogólne

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

1. W rozprawie napotyka się różne podejścia do opisu strat mocy w obwodzie sterownik-bramka tranzystora MOSFET. Autor zaczyna od standardowego wzoru na straty w obwodzie bramkowym w zależności od napięcia, ładunku i częstotliwości (równanie 4.7) a następnie podaje zależność na moc strat na rezystancji bramki (4.11), ponownie zdefiniowaną równaniem (4.13) i równanie opisujące straty w sterowniku (4.14) uzależnione od wartości skutecznej prądu i jego rezystancji. W rozdziale 5 definicje te są potarzana jako (5.4) i (5.5) a także pojawia się moc strat biegu jałowego oraz moc strat zasilania a następnie autor powtarza zmienione równanie (4.7). W dalszej kolejności (str.39) pojawiają się wzory opisujące straty w tranzystorach sterownika bramkowego oraz straty sterownika miękko-przełączającego (5.16). Proszę o dokładniejsze wyjaśnienie w jakich warunkach poszczególne wzory obowiązują a także jakie są wzajemne relacje miedzy stratami definiowanymi przez ładunek (lub pojemność), napięcie i częstotliwość (4.7) a tymi określanymi przez rezystancję i wartość skuteczną prądu (4.13) i (4.14) oraz jak się mają do tego straty w tranzystorach sterownika. Zauważmy, że gdy zastosujemy (4.7) wartość rezystancji wewnętrznej nie ma wpływu na poziom strat (tym bardziej wartość rezystancji tranzystorów użytych w sterowniku). Z kolei użycie tylko zależności (4.13) i (4.14) czyni straty niezależnymi od częstotliwości.
2. Nawiązując do pierwszej uwagi – rozdział 5 kończy charakterystyka (rys. 5.5), której, w moim odbiorze, głównym przesłaniem jest to, że straty sterownika rezonansowego powinny stanowić co najwyżej 40% strat sterownika twardo-przełączającego. Jednak wyniki pomiarów w rozdziale siódmym nie potwierdzają tak dużej przewagi tego drugiego rozwiązania, w niektórych punktach pracy sterowniki twardo-przełączalne mają nawet lepszą sprawność. Czy można prosić o komentarz do rozbieżności między wspomnianą charakterystyką a właściwościami badanych sterowników rezonansowych ?
3. W rozprawie Autor stwierdza, że wysoka wartość strat w stanie jałowym sterowników komercyjnych jest wynikiem zwarć skrośnych, których brak mają deklarować producenci. Posuwa się przy tym do podważania wiarygodności podawanych schematów obwodowych (s.46) i zarzuca producentom ukrywanie problemu zwarć skrośnych. Na potwierdzenie tezy, że jednak zwarcia te występują przywołuje fakt (s.47), że nie ma o nich mowy w nocie katalogowej [N12]. Niestety w pracy nie ma bezpośredniego, twardego dowodu na to, że Autor ma rację a wspomniane sterowniki komercyjne faktycznie mają ten problem – wyniki pokazują jedynie, że mają wyższe straty stanu jałowego. Czy Autor ma jakiś dowód bezpośredni, taki jak na przykład oscylogram z przebiegiem prądu zwarcia skrośnego pobieranego z kondensatora w torze zasilania ? Jeśli nie, to stwierdzenia powinny być mniej kategoryczne i podane w trybie przypuszczającym. Zwracam na to uwagę ponieważ w dzisiejszych czasach, gdy półprawdy i kwestionowanie wiedzy eksperckiej są na porządku dziennym, przedstawianie przez przyszłego doktora nauk technicznych spraw w ten sposób jest niezwykle szkodliwe - nawet jeśli ma w pełni rację.
4. W rozprawie pominięto znaczenie kondensatorów w torze zasilania, oprócz jednej wersji sterownika wartości ich pojemności nie są podane. Jedyny wyjątek

potwierdzający regułę (4xUCC27526v2) potwierdza, że problem jest istotny – dodanie szeregu kondensatorów poprawiło właściwości sterownika. Proszę o podanie stosowanych wartości pojemności i wyjaśnienie na jakiej zasadzie zostały one dobrane.

5. Autor przedstawia oszacowanie niepewności pomiarowych na str. 69, jednak zakłada, że mierniki prądu i napięcia mierzą tylko składowe stałe. Czy możliwym jest, że w mierzonych sygnałach jest też składowa przemienna, co niosłoby zapewne obniżenie dokładności pomiaru ? W moim odczuciu można by wytłumaczyć w ten sposób niższe straty układu oznaczonego jako 4xUCC27526v2 w stosunku do analogicznej wersji 4xUCC27526. Różnią się tylko większą baterią kondensatorów i stopniem odfiltrowania przebiegów od strony zasilania.
6. Sterownik 4xZXGD3003 wykazuje dosyć zadziwiające właściwości, nie wykazuje niemal strat biegu jałowego (rys.7.2), następnie pokazuje bardzo wysoką sprawność (rys. 7.6) by zostać zdyskwalifikowanym przez Autora z uwagi na zbyt wysoka temperaturę i zbyt niskie napięcie wyjściowe (str.76). Czy autor ma jakieś wyjaśnienie tych faktów ?
7. Na stronach 87 i 94 Autor stwierdza, że różnice w czasach propagacji między sterownikami komercyjnymi a proponowanymi rozwiązaniami wynikają z innej technologii wykonania (tzn. skali integracji). Jednak porównanie wyników z tabel 7.3 i 7.4 pokazuje, że czasy propagacji sterowników komercyjnych wydłużają się wraz z obciążeniem i niemal zrównują z tymi dla sterowników dyskretnych. Proszę o komentarz.
8. Przebiegi napięcia na bramce w układzie falownika (rys. 10.6) różnią się od tych pokazanych dla tego samego sterownika w rozdziale 9 (rys. 9.11) ? Z czego wynikają te różnice i czy spodziewane są one także dla innych badanych układów ?
9. Niewątpliwie Autor udowodnił w rozprawie wyższość własnego rozwiązania nad układami komercyjnymi w sensie parametrów a także kosztów (choć nie jest to jak proste bo koszt końcowy sterownika komercyjnego zawiera wiele innych składników). Czy należy się spodziewać, że proponowane rozwiązanie będzie także miało przewagę w kwestii trwałości i stabilności parametrów w dłuższym okresie czasu, szczególnie przy stresach termicznych występujących w urządzeniach energoelektronicznych ?

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
3,10,128	-	Metoda połączeń drutowych nie jest metodą nową
4	2	Dlaczego przekształcanie energii jest realizowane w przybliżeniu ?
13	9	Chodzi chyba o [56]
14	12	Można chyba oprzeć tranzystory o węglik krzemu, ale chyba chodziło o „wykorzystujące węglik krzemu"
18	-	Zdanie o wpływie rezystancji przewodzenia na straty w obwodzie bramkowym jest chyba nie do końca przemyślane.
20	-	Stwierdzenie o trzykrotnym wzroście rezystancji przewodzenia obowiązuje tylko dla krzemu
21	2.14	Stwierdzenie o nieprzekraczaniu zakresu temperatury od 80 do 120°C jest dosyć dyskusyjne
22	4.6	C_{GS} też jest nieliniowe, co pokazuje rys. 4.7 i potwierdza Autor na str. 71
22	6/7	Jednak nie wszystkie MOSFETy mają tak krótkie czasy przełączeń
27	4.11	Te przebiegi są dosyć istotne a rysunek jest mało przejrzysty
27	9	Po przekroczeniu napięcia progowego tranzystor jest w stanie aktywnym a stan nasycenia osiągnie gdy napięcie spadnie do wartości odpowiadającej iloczynowi prądu i rezystancji przewodzenia
27	15	Proces załączenia na rys. 4.11 kończy się w chwili t3
37	-	Wzory (5.1) i (5.2) już były w rozdziale 4
38,40	Rys. 5.2/5.3	Oznaczenie u_{GS} odnosi się do zacisków GS tranzystora a tu wskazywane jest wyjście sterownika
65		Powód przeniesienia 2-ch charakterystyk do załącznika jest niezrozumiały
66/67	Rys. 7.5	Rysunek powinien być na tej samej stronie
83	20	Temperatura radiatora była chyba różna dla różnych przypadków jeśli straty w sterownikach nie były identyczne

85	-	Brakuje zestawienia dla obciążenia bramką MOSFETa
91-92	-	Nie do końca jest jasne w jakim stanie sterownika dokonywano pomiarów R_{OUT}
92	Tab. 7.7	Czy tak duża wartość R_{OUT} dla DEIC515 ma potwierdzenie w nocie katalogowej ?
99	-	Dwukrotne powtórzenie tłumaczenia angielskiego bez nawiasu
105	-	Brak zdjęcia omawianej obudowy/sterownika w obudowie
113/14	9.17	Brak informacji o parametrach T1/T2
117/124	10.1/10.4	Schemat z dodanym źródłem prądu jest nieczytelny
123	10.3	P_{DR} to chyba błędne oznaczenie, wcześniej było P_{ZAS}

5. Ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska zawiera część analityczną, symulacyjną i przede wszystkim eksperymentalną, które mimo wymienionych uwag o charakterze dyskusyjnym należy ocenić pozytywnie. Autor sformułował tezę, którą bez wątpienia udowodnił, w szczególności przeprowadzając badania eksperymentalne sterowników bramkowych pracujących przy wysokich częstotliwościach. Co więcej, zaproponowany sterownik bramkowy dla tranzystora MOSFET pracuje poprawnie w zakresie częstotliwości do 30MHz i wykazuje lepsze parametry energetyczne od rozwiązań komercyjnych oraz zbliżone parametry dynamiczne. Wyniki tych badań należy uznać za istotne, co potwierdza opublikowanie ich w periodykach oraz na konferencjach krajowych. Pozostaje żałować, że Autor nie zdecydował się na publikacje o zasięgu międzynarodowym, ponieważ uzyskane wyniki z pewnością obroniłyby się w najlepszych czasopismach. Wnoszą one liczący się wkład w poszerzenie stanu wiedzy z zakresu projektowania sterowników bramkowych dla tranzystorów MOSFET pracujących przy częstotliwościach rzędu dziesiątek MHz. Autor wykazał się dobrą znajomością energoelektroniki i elektroniki a w szczególności metod projektowania obwodów drukowanych, technik symulacji komputerowej oraz metod prowadzenia badań eksperymentalnych przy wysokich częstotliwościach, w tym technik pomiarowych.

Za osiągnięcia własne Autora uznaję:

- opracowanie dziewięciu rozwiązań sterowników bramkowych dla tranzystorów MOSFET pracujących w zakresie częstotliwości do 30MHz, w tym dwóch sterowników rezonansowych
- dokonanie szczegółowych eksperymentalnych badań porównawczych opracowanych układów z czterema sterownikami komercyjnymi z naciskiem na parametry energetyczne i właściwości dynamiczne oraz parametry pasożytnicze,
- przeprowadzenie badań jednego ze sterowników w układzie falownika rezonansowego klasy E o mocy 300W,
- wykonanie trójwymiarowego modelu termicznego jednego ze sterowników bramkowych
- opracowanie prostego modelu symulacyjnego jednego ze sterowników bramkowych

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa przedstawiona przez mgr inż. Piotra Legutko pt. „ **Analiza wysokoczęstotliwościowych drajwerów tranzystorów MOSFET mocy stosowanych w falownikach rezonansowych"** stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje zadawalający poziom wiedzy teoretycznej oraz 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 i może być dopuszczona do publicznej obrony.