POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
wpłynęło dnia 7.06.2022
nr 10 zał. .....

Dr hab. inż. Paweł Szcześniak, prof. UZ
Uniwersytet Zielonogórski
Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki
ul. Prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra

Zielona Góra, 06.06.2022

# RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR. INŻ. KAMILA KIEREPKI

Tytuł rozprawy:
**Analiza i badania dwuczęstotliwościowych falowników rezonansowych do nagrzewania indukcyjnego**
Promotor: dr hab. inż. Marcin Kasprzak, prof. PŚ
Promotor pomocniczy: dr inż. Piotr Legutko

Recenzja została wykonana na podstawie Uchwały nr 13/2022 Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, Politechniki Śląskiej z dnia 15 marca 2022 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kamila Kierepki.

## 1. Tematyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa dotyczy badania właściwości rezonansowych przekształtników energoelektronicznych do nagrzewania indukcyjnego z wykorzystaniem sygnału prądowego płynącego przez wzbudnik układu grzejnego, z dwoma składowymi o różnych częstotliwościach (falowniki dwuczęstotliwościowe). Cechą charakterystyczną tych falowników jest możliwość uzyskania dwóch składowych prądu, średniej i dużej częstotliwości, w jednej topologii przekształtnika. Ponadto badane topologie falowników posiadają możliwość niezależnego dopasowania impedancji wyjściowej falownika do impedancji obciążenia, możliwość sterowania mocy każdej ze składowych prądu oraz bardzo wysoki współczynnik sprawności sięgający około 97%. Tematyka ta związana jest z dynamicznym rozwojem indukcyjnego nagrzewania powierzchniowego metali, zwłaszcza struktur o nieregularnym kształcie. Realizacja tego zadania wymaga specjalnej konstrukcji urządzeń energoelektronicznych o dużej sprawności energetycznej do generacji sygnałów prądowych o dużej częstotliwości roboczej zasilających wzbudnik układu grzewczego. Wymaga to zastosowania w falownikach tranzystorów mocy

wykonanych z węglika krzemu (SiC), których parametry są korzystne przy przełączaniu tranzystorów z wielką częstotliwością. Dlatego wybór tematyki rozprawy uważam za oryginalny i aktualny a podjęcie badań w tym temacie za zasadne.

## 2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Celem rozprawy doktorskiej był opis i badanie właściwości dwuczęstotliwościowych falowników rezonansowych do rezonansowego nagrzewania indukcyjnego powierzchni metalowych, zbudowanych z tranzystorów MOSFET na bazie tranzystorów SiC. W rozprawie zaprojektowano i przebadano trzy topologie takich falowników, nazwane w pracy 2T (dwa półmostki tranzystorowe), 3T (trzy półmostki tranzystorowe) oraz 2T1C (dwa półmostki tranzystorowe i dzielnik pojemnościowy). Projekt falowników poprzedzony był analizą teoretyczną poszczególnych elementów składowych systemu. Dodatkowo, ważnym osiągnięciem było również opracowanie i weryfikacja opisu strat energii w falownikach. W opisach tych wykorzystano parametry urządzeń z not katalogowych oraz modele dostępne w programie LTspice, dla półprzewodników użytych w projekcie eksperymentalnym.

Rozprawa liczy 145 stron i składa się z 7 rozdziałów, wykazu bibliografii oraz czterech dodatków. W początkowej części pracy, po *Spisie treści* oraz *Wykazie ważniejszych oznaczeń,* Autor zamieścił *Wstęp*. Zawiera on krótkie wprowadzenie, motywację, tezę rozprawy, cel i założenia pracy oraz przedstawia strukturę rozprawy. We wprowadzeniu autor krótko opisał tematykę związaną z nagrzewaniem indukcyjnym. W następnym podrozdziale została opisana motywacja do podjęcia tematu. Głównymi jej składowymi były: nowość technologiczna proponowanych w rozprawie rozwiązań, z wykorzystaniem nowoczesnych tranzystorów mocy wykonanych w technologii z węglika krzemu (SiC), propozycja rozwiązania systemu ze zmniejszoną liczbą komponentów jak również niewielka liczba publikacji naukowych opisujących poruszane w rozprawie zagadnienia techniczne. Autor formułuje następującą, dość rozbudowaną, tezę pracy:

*„Możliwe jest skonstruowanie przekształtnika do indukcyjnego nagrzewania dwuczęstotliwościowego z jednym falownikiem zasilającym, o następujących właściwościach:*

- *możliwości niezależnego dopasowania falownika do wartości minimów impedancji obciążenia,*
- *możliwości sterowania mocy każdej ze składowych w zakresie 30-100% ich mocy znamionowej,*
- *sprawności energetycznej falownika powyżej 97%.”*

Następnie Autor definiuje cele ogólne i szczegółowe pracy, służące potwierdzeniu tezy rozprawy. Zostały one omówione w kolejnych rozdziałach rozprawy. Dodatkowo w rozdziale

pierwszym doktorant opisuje założenia przyjęte w pracy, które wskazują na funkcjonalność proponowanych falowników, parametry nominalne budowanych prototypów oraz założenia upraszczające w proponowanym modelu teoretycznym. Na końcu tego rozdziału opisana jest struktura pracy.

W rozdziale drugim przedstawiony został przegląd literatury dotyczący badań w zakresie systemów dwuczęstotliwościowych do nagrzewania indukcyjnego, z podziałem na badania na świecie i badania w Polsce. Dość szczegółowo odniesiono się do badań różnych topologii do nagrzewania dwuczęstotliwościowego. Negatywnym aspektem tego przeglądu literatury jest fakt, że doktorant nie zamieścił w tekście pracy schematów żadnej z omawianych struktur falowników dwuczęstotliwościowych. Czytelnik rozprawy we własnym zakresie musi dotrzeć do omawianej literatury (co nie zawsze jest łatwe), w celu zdobycia podstawowej wiedzy o strukturach omawianych topologii. Dodanie kilku rysunków z topologiami wcześniej proponowanymi w literaturze nie zwiększyłoby znacznie rozmiarów prezentowanej rozprawy doktorskiej.

W rozdziale trzecim autor dokładniej omawia zagadnienia związane z dwuczęstotliwościowym nagrzewaniem indukcyjnym. Omówione są tam takie zagadnienia jak zmienność rezystancji zastępczej układu wzbudnik-wsad wynikająca ze: zmiany przenikalności magnetycznej na powierzchni wsadu spowodowanej wzrostem temperatury, zmiany przenikalności magnetycznej związanej z nieliniowością charakterystyki magnesowania materiału ferromagnetycznego oraz ze zmian konduktywności powodowanymi zmianami temperatury materiału. Następnie doktorant opisuje zjawisko naskórkowości przepływu prądu w materiale wsadowym. Również w tej części opisu teoretycznego przytoczonych jest bardzo mało referencji do wcześniejszych badań naukowych szczegółowo wyjaśniających dość złożone zagadnienia fizyczne. W kolejnym podrozdziale wskazane są metody sterowania w hartowaniu indukcyjnym kół zębatych jako przykład powierzchni o nieregularnym kształcie. Pod koniec tego rozdziału Autor rozprawy wskazuje wybrane topologie falowników dwuczęstotliwościowych przyjętych do badań w ramach pracy. Są to wcześniej wymienione w recenzji topologie nazwane 2T, 3T oraz 2T1C. Wskazanie tych topologii w tym rozdziale, według recenzenta, jest nie do końca słuszne. Poprawnym umiejscowieniem tego podrozdziału byłby rozdział drugi, gdzie po ogólnym przeglądzie literatury dotyczących badań nad nagrzewaniem indukcyjnym metali oraz topologii przekształtników energoelektronicznych wykorzystywanych w tym procesie, doktorant wskazałby swoje propozycje w tym zakresie.

W kolejnym, czwartym rozdziale zatytułowanym „Analiza modelu falownika 2F" dokonano omówienia modelów obciążenia falownika o strukturach szeregowego obwodu RLC oraz szeregowo-równoległego obwodu – nazywanego dalej w pracy obwodem 2F. W rozdziale tym przedstawiono modele matematyczne poszczególnych obwodów rezonansowych RLC oraz 2F

w odniesieniu do impedancji charakterystycznej oraz rezystancji zastępczej wzbudnik-wsad. Następnie opracowano postaci analityczne źródeł zasilania obwodów rezonansowych. Były to źródła monoharmoniczne, prostokątne oraz sterowane szerokością impulsu (PWM). Dla przedstawionego opisu źródeł wyznaczono zależności opisujące moce wyjściowe w funkcji częstotliwości względnej oraz dobroci układu Q. Ponadto opisano zależności napięciowe na kondensatorach rezonansowych. Przedstawione w tym rozdziale modele i wyniki analizy teoretycznej układu rezonansowego dla różnych wymuszeń źródła zasilającego są wartościowe z punktu analizy teoretycznej zagadnienia. Można jednak odnieść wrażenie, że tytuł rozdziału jest zbyt ogólnie sformułowany. W rozdziale tym nie jest omawiany model konkretnego falownika 2F ale odpowiedź wybranych układów rezonansowych na różnego typu wymuszenie napięciowe.

Rozdział piąty poświęcony jest omówieniu struktur proponowanych w pracy falowników 2F. Omówione zostały topologie falowników 3T oraz 2T1C. Przedstawiono ich strategie sterowania dla modulacji: monochromatycznej średniej częstotliwości (MF – medium frequency), monochromatycznej wysokiej częstotliwości (HF – high frequency) oraz poliharmonicznej MF i HF. Omówiono rozpływy prądów w poszczególnych topologiach z uwzględnieniem prądu upływu. W rozdziale tym brakuje omówienia topologii 2T. Jest to tym bardziej niezrozumiałe, że Autor w podrozdziale 3.3 wskazuje trzy topologie przyjęte do analizy w pracy: „Do badań prowadzonych w ramach rozprawy wytypowano trzy topologie wykorzystujące możliwie najmniejszą liczbę podzespołów, które zaprezentowano na rysunkach 3.4-3.6”. Następnie Doktorant analizuje poszczególne stany pracy falownika mostkowego z określeniem występujących komutacji zaworowych dla przypadku obciążenia RLC stanowiącego przypadek referencyjny. W ostatniej części rozdziału omówiona została analiza strat mocy w falowniku. Opracowany został również sposób obliczania strat bazujący na danych katalogowych półprzewodników, z których jest wykonany falownik oraz na modelach półprzewodników dostępnych w programie LTspice.

W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych prototypów falowników dwuczęstotliwościowych o mocy 4 kW. W pierwszych podrozdziałach omówiony został dobór poszczególnych elementów składowych falowników, w którym zawarto: tranzystory mocy, kondensatory obwodu DC, radiator wraz z wentylatorem, sterowniki bramkowe tranzystorów mocy, sterowanie bazujące na układzie FPGA, obwód obciążenia wraz z transformatorami dopasowującymi oraz system pomiaru temperatury. Następnie przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych topologii falowników 2T1C, 3T oraz 2T. Falowniki o topologiach 2T1C oraz 3T przebadano pod kątem pracy poliharmonicznej oraz monoharmonicznej natomiast falownik o topologii 2T zbadano w ograniczonym zakresie jedynie dla przypadku pracy poliharmonicznej. Wyniki badań eksperymentalnych zawierają przykładowe

przebiegi czasowe napięć i prądów wyjściowych falowników dla poszczególnych typów modulacji monoharmonicznej oraz poliharmonicznej. Dodatkowo zostały wyznaczone charakterystyki sterowania mocy poszczególnych składowych MF oraz HF wykonanych na podstawie pomiarów oscyloskopowych oraz z wykorzystaniem analizatora mocy. Wyniki badań uzupełniono wyznaczeniem charakterystyk współczynnika sprawności w funkcji częstotliwości poszczególnych składowych MF oraz HF. Charakterystyki te wykonane były na podstawie pomiarów analizatorem mocy oraz na podstawie pomiaru strat energii metodą termiczną. W końcowej części rozdziału zestawiono wyniki pomiarów mocy oraz obliczeń modelu. Osiągnięto zadowalającą zbieżność obliczeń modelu względem rezultatów pomiarów laboratoryjnych. Wszystkie uzyskane w tym rozdziale wyniki badań są wartościowe w kontekście postawionej tezy rozprawy i wskazują na możliwość budowy przekształtnika do indukcyjnego nagrzewania dwuczęstotliwościowego z jednym falownikiem zasilającym, z możliwością niezależnego dopasowania impedancji falownika do impedancji obciążenia, możliwością sterowania mocy składowych MF i HF oraz współczynnikiem sprawności powyżej 97%.

Rozdział siódmy zawiera dyskusję wyników, podsumowanie i sformułowanie najważniejszych osiągnięć Autora. Ponadto wskazane zostały w nim propozycje dalszych badań w kontekście poruszanych w rozprawie zagadnień naukowych.

Bibliografia zawiera 81 pozycji literaturowych z rozdzieleniem wykazu na książki, monografie, patenty (20 pozycji), artykuły (57 pozycji) oraz noty aplikacyjne (4 pozycje).

W końcowej części pracy znajdują się dodatki zawierające: Dorobek naukowy doktoranta (Dodatek A), Wykaz użytej aparatury (Dodatek B), Rachunek niepewności pomiarowych (Dodatek C) oraz Układ sterowania FPGA (Dodatek D).

Pracę kończy streszczenie w języku polskim i angielskim oraz oświadczenie kandydata o oryginalności rozprawy doktorskiej.

## 3. Uwagi ogólne

1) Praca napisana jest niedbale pod względem językowym. W tekście występuje dużo zwrotów potocznych, niedopowiedzeń i skrótów myślowych. Doktorant nie próbuje wprowadzić czytelnika w zagadnienie często podając suche fakty. Narracji brakuje spójności, czytelnik niejednokrotnie musi domyślać się dlaczego dany opis znajduje się w określonym miejscu pracy .

   Przykładem takiego niedokładnego opisu jest rozdział 4, gdzie omówiony jest model falownika 2F. Nie jest wyjaśniony cel tego modelowania, motywy analizy napięcia kondensatorów rezonansowych, motywy analizy źródła napięcia opisanego szeregiem Fouriera. Może należało dodać prosty schemat zastępczy modelu w postaci źródła

wymuszenia o różnym kształcie napięcia (sinusoidalne, prostokątne, impulsowe PWM) oraz model obciążenia. Wówczas czytelnik w sposób ogólny miałby ogląd tworzonego modelu. Autor pisze w pracy: „Napięcie występujące na kondensatorach rezonansowych jest istotnym parametrem w kontekście doboru odpowiednich kondensatorów na etapie projektu układu fizycznego.” Natomiast w rozdziale szóstym gdzie umieszczony jest opis układu eksperymentalnego i dobór komponentów układu nie ma żadnej wzmianki o doborze kondensatorów obwodu rezonansowego. Można więc założyć, że cała analiza napięć na kondensatorach obwodu rezonansowego jest niepotrzebna w pracy. W kontekście przyjętych modeli źródeł Doktorant pisze w pracy: „Zależnie od metody sterowania FM lub PWM są źródłem napięcia o kształcie prostokątnym lub modulowanym trzypoziomowo”. Natomiast analiza układu przeprowadzona jest dla napięcia monoharmonicznego (sinusoidalnego), prostokątnego oraz modulowanego PWM. I znów rodzi się pytanie czy wyniki uzyskane dla wymuszenia monoharmonicznego są niezbędną częścią pracy, skoro analizowane falowniki napięcia nie generują takiego napięcia?

Z przedstawionego przykładu wyłania się obraz dość chaotycznego stylu rozprawy doktorskiej. W kontekście ogólnej oceny rozprawy, styl oraz poprawność językową należy ocenić krytycznie. Dodatkowe przykłady błędów w opisach, niedopowiedzeń i używania zwrotów potocznych w treści rozprawy zostały przytoczone w uwagach szczegółowych.

2) Jakie było przyjęte kryterium cytowania literatury w tekście rozprawy? Wyróżnia się dwa podstawowe kryteria: alfabetyczne bądź kolejność cytowania. Wydaje się, że pozycje literaturowe w wykazie bibliografii zostały umieszczone w sposób przypadkowy. Taki sposób cytowania literatury bardzo utrudniał rzetelne przeprowadzenie recenzji oraz wskazuje na brak znajomości edycji tekstów naukowych przez Doktoranta. Przykładem błędnej numeracji bibliografii jest rozdział *2.2 Badania w Polsce*, gdzie w tekście podrozdziału numeracja literatury maleje od pozycji [46] do [39]. W innych częściach pracy sytuacja się powtarza, a numeracja bibliografii ma charakter przypadkowy. Dodatkowo aż sześć pozycji literaturowych nie było nigdzie cytowanych w tekście rozprawy.
3) Wstęp do pracy naukowej często jest wskazaniem jej zakresu w oparciu o aktualny stan nauki lub wiedzy technicznej. Poparty on jest wykazem literatury naukowej oraz branżowej, na podstawie której czytelnik pracy może się zorientować o potrzebności i złożoności zagadnienia. W recenzowanej pracy we wstępie do pracy nie ma zacytowanej żadnej referencji, choć doktorant opisuje różne typy nagrzewania powierzchniowego, topienia metali oraz różne złożone zjawiska fizyczne. Również w dalszej części pracy cytowanie referencji jest dość oszczędne.

4) Należy krytycznie odnieść się do rozdziału drugiego przedstawiającego przegląd literatury, w którym doktorant nie zamieścił schematów żadnej z omawianych struktur falowników dwuczęstotliwościowych. Dodanie rysunków z przeglądem topologii nie spowodowałoby znacznego zwiększenia rozmiarów rozprawy doktorskiej, a czytelnik miałby ogląd co do stosowanych topologii w nagrzewaniu dwuczęstotliwościowym. Byłoby to również zasadne z powodów praktycznych. Doktorant w rozprawie bardzo szczegółowo omawia a wręcz recenzuje dane artykuły, brakuje natomiast podstawowych informacji z zakresu topologii przekształtników.
5) Nie wszystkie oznaczenia symboli i skrótów używanych w rozprawie są wyjaśnione. Znaczenia niektórych, stosowanych w pracy oznaczeń, czytelnik musi się sam domyślać lub bazować na swojej wiedzy w tym zakresie. Część stosowanych oznaczeń jest po prostu błędna. Przykładem takiego błędnego oznaczenia lub niedokładnego opisania użytych zmiennych jest równanie (4.12), gdzie podane są zależności na pulsacje względne. Prawdopodobnie zależność na $\omega_2^{\bullet}$ jest błędnie podana, gdyż nigdzie wcześniej nie ma zdefiniowanej wartości pulsacji $\omega_2$. W wykazie oznaczeń jest to pulsacja sygnału nośnego. Jednak w analizowanych wzorach prawdopodobnie nie jest to poprawne oznaczenie. Również schematy przedstawione na rysunkach 4.1 oraz 4.3 są już schematami zastępczymi po dokonanym opisie w jednostkach względnych, natomiast Doktorant w tekście rozprawy powołuje się w analizie na te schematy jakby były opisane w jednostkach bezwzględnych. O ile na rys. 4.1 zaznaczono dodatkowo jednostki bezwzględne to na rys. 4.3 już nie. Najpierw powinien być umieszczony schemat w jednostkach bezwzględnych, potem dokonany opis w jednostkach względnych, a na koniec podany schemat zastępczy w jednostkach względnych. W pracy natomiast w pierwszej kolejności przedstawiony jest schemat obwodu opisanego w jednostkach względnych a następnie jest on wyprowadzany. Jest to działanie wsteczne do przeprowadzonej analizy.
6) Uwagi na temat stylu pisania i ogólnych błędów w pracy przytaczane są w części szczegółowej recenzji. Zdecydowałem się na zamieszczenie ich w głównym wątku recenzji, gdyż wskazują na dość słaby poziom opisu i prezentacji wyników w wykonaniu Doktoranta. Krytyczne spojrzenie na ten aspekt rozprawy doktorskiej, może nasuwać pytanie ogólne nie do samej pracy ale do roli i pomocy promotora pomocniczego przy pisaniu rozprawy. Moim zdaniem promotor pomocniczy powinien czynnie wspierać Doktoranta chociażby w dopracowaniu tekstu rozprawy i formy prezentacji wyników.
7) Teza rozprawy sformułowana jest mało precyzyjnie co wynika ze wspomnianych błędów i stylu pisania Doktoranta. Stwierdzenie typu „możliwości niezależnego dopasowania falownika do wartości minimów impedancji obciążenia," jest nieprecyzyjne. O jakie

dopasowanie chodzi? Znów czytelnik musi się domyślać. Opis w dziedzinie technicznej powinien precyzyjnie odnosić się do parametrów technicznych. W tym wypadku prawdopodobnie sformułowanie powinno brzmieć: „dopasowanie impedancji wyjściowej falownika do wartości minimów impedancji obciążenia". Również stwierdzenie „możliwości sterowania mocy każdej ze składowych", jest nieprecyzyjne. O jakich składowych jest mowa w tym punkcie? Teza jest jednym z ważniejszych punktów rozprawy doktorskiej. Takie nieprecyzyjne jej sformułowanie jest niedopuszczalne. Jest sprawą oczywistą, że czytelnik o większej wiedzy z dziedziny elektrotechniki zrozumie co Autor miał na myśli, ale taki styl pisania i brak precyzji opisu budzić może niepotrzebne wątpliwości.

8) Doprecyzowania wymaga informacja czy charakterystyki sterowania mocy dla szeregowego obwodu RLC przedstawione na rys. 4.9 oraz rys. 4.10 są wyznaczone dla $R=const$ czy $R=f(\omega)$. Bak jest takiej informacji w opisie wyników badań. Analizując charakterystyki sterowania mocą z rys. 4.11 można się domyśleć, że wyniki z Rys. 4.9 oraz Rys. 4.10 są przeprowadzone dla $R=f(\omega)$. Podobne pytanie dotyczy charakterystyk sterowania mocy dla obwodu 2F przedstawionych na rys. 4.12 oraz rys. 4.13. Doprecyzowania wymaga również fakt, że tylko rezystancja $R_2$ modelowana jest w funkcji pulsacji $\omega$. Przy opisie porównania charakterystyk sterowania mocy dla układu 2F zaprezentowanych na rys. 4.14 napisane jest ogólnie, że wyniki są uzyskane dla $R= const$ oraz $R=f(\omega)$. Prawdopodobnie powinno być $R_2= const$ oraz $R_2=f(\omega)$.
9) We wstępie do rozdziału piątego Doktorant pisze, że „Dokonano zgłoszeń patentowych na omawiane układy ze względu na wprowadzone nowe elementy w topologiach, które znacząco poprawiają ich funkcjonalność." W rozprawie Autor w ogóle nie wspomina o nowych elementach wprowadzonych do topologii. Proszę o krótki komentarz dotyczący nowości w prezentowanych topologiach.
10) W rozdziale piątym analizowane są rozpływy prądów upływu $i_{up}$. Dlaczego prąd upływu $i_{up}$ występuje w układach 2T1C oraz 3T tylko dla pracy monoharmonicznej HF oraz poliharmonicznej, a źródłem prądu jest prąd składowej HF? Dlaczego prąd ten nie występuje przy pracy monoharmonicznej MF?
11) W podrozdziale 5.4 doktorant omawia komutacje zaworowe w falowniku. Z dużą precyzją opisuje procesy zachodzące podczas przełączania dla przypadku pracy w charakterze indukcyjnym (rys. 5.19) i pojemnościowym (rys. 5.20) impedancji obciążenia. Brakuje przebiegów czasowych poszczególnych sygnałów, na podstawie których opis zjawisk komutacyjnych byłby bardziej przejrzysty. Doktorant wymaga od czytelnika zobrazowania

opisywanego procesu we własnej wyobraźni. Należałoby również dodać literaturę na temat opisywanych procesów komutacyjnych.

12) W podrozdziale 5.5 Doktorant prezentuje analizę strat mocy w falowniku. Na poszczególnych wykresach prezentowane są wyniki analizy uzyskanej na podstawie danych katalogowych i modeli uzyskanych w programie symulacyjnym LTspice. Doktorant wielokrotnie w tekście rozprawy pisze, że dane uzyskane na podstawie programu LTspice są oznaczone na rysunkach jako LT. Jednakże żadna z prezentowanych charakterystyk nie posiada takiego oznaczenia. Czy zatem prawdą jest, że oznaczenia C2 oraz C4 w poszczególnych charakterystykach stanowią wyniki dla modelu z programu symulacyjnego LTspice?
13) W podsumowaniu rozdziału piątego doktorant pisze, że w rozdziale tym wskazano zależności opisujące straty mocy związane z przeładowaniem obwodu bramkowego $P_{DB}$. Niemniej jednak w tekście pracy nie ma takich zależności. Na stronie 87 napisano, że: „Straty bramkowe nie zostały ujęte w modelu ze względu na ich niewielką wartość (na półmostek $P_{DG}$ = 355 mW (5.5) przy $f$ = 100 kHz)". W takim razie czy Doktorant może opisać/wskazać zależność opisującą straty mocy związane z przeładowaniem obwodu bramkowania w zależności od częstotliwości, bądź mocy wyjściowej półmostka tranzystorowego? Czy wartość mocy $P_{DG}$ wskazana w pracy została wyznaczona analitycznie czy jest wynikiem pomiarów?
14) W rozdziale dotyczącym badań eksperymentalnych, pomiar współczynnika sprawności odbywał się przy użyciu dwóch metod z wykorzystaniem analizatora mocy oraz metody termicznej. Opis metody termicznej wskazuje na wstępny proces skalowania temperaturowego układu pomiarowego i wyznaczenia funkcji wielomianowych aproksymujących straty mocy. W pracy nie opisano szerzej tych funkcji aproksymujących. Jaka jest dokładność przedstawionego procesu aproksymacji strat mocy na podstawie pomiaru temperatury?
15) Do badań w pracy wytypowane zostało trzy topologie falowników dwuczęstotliwościowych o następujących nazwach stosowanych w rozprawie: 2T, 2T1C oraz 3T. Jednak nie wszystkie analizy w rozprawie uwzględniają topologię 2T. W rozdziale piątym opisano zasadę działania tylko dwóch falowników dwuczęstotliwościowych 2TC1 oraz 3T. W badaniach eksperymentalnych zbadano wszystkie trzy topologie. Natomiast w badaniach porównawczych falowników ze względu na straty mocy i sprawność oraz w podrozdziale poświęconym weryfikacji modeli znów opisano wyniki tylko dla dwóch topologii. Skąd wynika taki opis?

## 4. Uwagi szczegółowe

- Edycja tekstu

Praca pomimo ogólnej poprawności pod względem edytorskim zawiera niewielką liczbę błędów edycyjnych: str. 9: *gł**o**wnie* – gł**ó**wnie, str. 14: *różnicw* – różnic w, str. 71: *gałąź(trzecia: s3)* – gałąź (trzecia: s3).

Ponadto Doktorant często zostawia puste miejsca na stronach – np. puste pół strony w środku rozdziału (strony 22, 26, 30, 42, 45, 89, 98, 107, 112, 118). Edycja pracy powinna być tak przeprowadzana, by wolne miejsca były zapełnione np. tekstem.

Kolejny błąd edycyjny dotyczy rozpoczynania podrozdziału od rysunku (podrozdziały 4.1.1 oraz 4.1.2), zwłaszcza gdy prezentowane rysunki są wynikami analizy prezentowanej w danym podrozdziale. Wymagane jest przynajmniej jedno zdanie po tytule podrozdziału przed rysunkiem.

Dwa wzory mają tą samą numerację (5.13) – str. 85 oraz str. 86.

Złe przywołanie rysunku w tekście pracy na stronie 81: „Wprowadzono oznaczenie C2 określające przypadek z rysunku 5.12a oraz oznaczenie C4 określające przypadek z rysunku 5.12b". Powinno być: „Wprowadzono oznaczenie C2 określające przypadek z rysunku 5.21a oraz oznaczenie C4 określające przypadek z rysunku 5.21b"

Pozycje literaturowe [7], [10], [13], [18], [19], [47] nie były nigdzie cytowane w tekście.

- Styl tekstu

Doktorant stosuje bardzo dużą liczbę zwrotów potocznych bądź niedookreśleń. Przykładowe zwroty użyte w tekście rozprawy oraz opisy występujących w nich błędów wymienione zostały poniżej:

Str. 7: „jako wariant nieprzewodzący lub przewodzący." – co przewodzący? Prąd elektryczny, pole elektromagnetyczne?

Str. 10: „dopasowania falownika do wartości minimów prądów" – dopasowania pod jakim względem?

Str. 9: „dwoma częstotliwościami MF i HF"? – częstotliwościami jakiego sygnału, prądu, napięcia?

Str. 10: „możliwość dopasowania" – czego?

Str. 16: „szeregowy tranzystor półmostka" – nie jest jasne który to tranzystor – zastosowany skrót myślowy.

Str. 17: „kąta przesunięcia fazowego" – pomiędzy jakimi sygnałami?

Str. 38: „przypadek ujmuje wstęgi dla grupy $m$=1" – wstęgi czego? Co to są te wstęgi?

Str. 40: „wartość pierwszej harmonicznej napięcia” – wartość częstotliwości czy amplitudy? Doktorant powinien używać zwrotu amplituda napięcia/prądu zamiast wartość napięcia/prądu.

Str. 79: „składowych energii przełączeń” – zwrot niezrozumiały.

- Oznaczenia i skróty

Skrót ZVS/ZCS użyty był już na stronie 9, a wyjaśniony został na stronie 14.

Nie wyjaśniono następujących skrótów: PWM, NZCS, MES, FPGA, PCB, NTC.

Na stronie 16 użyto zapisu „D→sT”, który nie został objaśniony.

Niewyjaśnione oznaczenia, których znaczenia należało się domyślać:

$x$ we wzorze (3.3);

$h$ oraz $E$ we wzorze (4.26);

$J$, $m$, $n$ oraz $M$ we wzorze (4.29);

$N_1$, $N_2$ we wzorze (5.2);

$N_3$, $N_4$ we wzorze (5.3).

Prądy i napięcia opisywane w podrozdziałach 4.3 oraz 4.4 powinny być zaznaczone odpowiednio na rysunkach 4.1 oraz 4.3. Ułatwiłoby to analizę przedstawionego opisu, zwłaszcza, że Doktorant używał bardzo rozbudowanych nazw poszczególnych zmiennych.

## 5. Ocena rozprawy

Opiniowana praca zawiera część analityczną oraz eksperymentalną, stanowi oryginalne zbadanie i rozwiązanie problemu naukowego. Pomimo wielu krytycznych uwag co do formy opisu zagadnienia i opisu otrzymanych wyników analiz oraz badań, należy stwierdzić, że doktorant wykazał się dobrą znajomością energoelektroniki, modelowania matematycznego oraz metod pomiarowych. Pozytywnie należy również ocenić zdolności konstrukcyjne i projektowe układów elektronicznych. Doktorant powinien bardzo mocno popracować nad stylem prezentacji wyników i ich opisu.

Do najważniejszych osiągnięć doktoranta należy zaliczyć:

- opis właściwości dwuczęstotliwościowych falowników rezonansowych o topologiach 2T1C oraz 3T;
- opracowanie modeli matematycznych obwodu obciążenia dla różnych modeli źródła zasilania;
- analiza strat energii powstałych w falowniku na podstawie danych katalogowych oraz modeli symulacyjnych w programie LTspice.

- opracowanie i budowa trzech dwuczęstotliwościowych falowników rezonansowych do nagrzewania indukcyjnego;
- przeprowadzenie szczegółowych badań i analiz właściwości skonstruowanych prototypów;
- opracowanie analiz porównawczych właściwości dwuczęstotliwościowych falowników rezonansowych dla różnych trybów pracy (monoharmonicznego MF i HF oraz poliharmonicznego).

## 6. Wnioski końcowe

Uważam, że Doktorant rozwiązując postawione sobie zadanie wykazał się wystarczającą wiedzą z dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. Krytyczna ocena stylu napisanej rozprawy powinna zmotywować Doktoranta do poprawy swoich umiejętności w tym zakresie. Przedstawione uwagi polemiczne i dyskusyjne w żaden sposób nie podważają merytorycznej oceny przedstawionej pracy, a rozprawa doktorska stanowi samodzielny wkład Doktoranta w aktualny stan wiedzy.

Recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.