Kraków, 6 czerwca 2022

Dr hab. inż. Adam Penczek, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Katedra Energoelektroniki i Automatyki
Systemów Przetwarzania Energii

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
wpłynęło dnia 15.06.2022
nr 13 zał:

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

*„**Analiza i badania dwuczęstotliwościowych falowników rezonansowych do nagrzewania indukcyjnego**”* autorstwa **mgr inż. Kamila Kierepki**

Wykonana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej Dr hab. Inż. Moniki Kwoki z dnia 6 kwietnia 2022 r.

I. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Tematyka rozprawy dotyczy wykorzystania falowników rezonansowych z miękkim przełączaniem w procesie dwuczęstotliwościowego nagrzewania. Ta stosunkowo nowa metoda umożliwia kształtowanie rozkładu pola temperatury przy powierzchni nagrzewanych elementów o nieregularnym kształcie takich jak np. koła zębate. Proces nagrzewania indukcyjnego charakteryzuje się dużą zmiennością parametrów odbiornika oraz obwodu rezonansowego jaka ma miejsce na skutek zmiany temperatury wsadu. Kontrola procesu odbywa się poprzez zmianę parametrów źródła zasilania jakim jest falownik rezonansowy pracujący z wysoką częstotliwością przy ograniczaniu strat poprzez stosowanie miękkiego przełączania łączników (ZVS lub/i ZCS).

Rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Kierepki przedstawiona jest na 145 stronach. Zawiera ona 7 rozdziałów (str. 7-129) oraz 4 załączniki : Dodatek A „ Dorobek naukowy doktoranta” (str. 136-138) , Dodatek B „Wykaz użytej aparatury” (str. 139-140) , Dodatek C „Rachunek Niepewności pomiarowych” (str. 140) Dodatek D „Układ sterowania FPGA” (str. 141).
Bibliografia (str. 130-135) obejmuje 77 pozycji literaturowych (w tym dwie, których współautorem jest Doktorant) oraz 4 odwołania do not aplikacyjnych. Ponad to, w rozprawie doktorskiej znajduję się Wykaz najważniejszych oznaczeń (str. 6) oraz streszczenie w języku polskim (str. 143) i w języku angielskim (144).

Na wstępie została przez Doktoranta sformułowana teza rozprawy:
„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%”*

Aby dowieść postawionej tezy Doktorant wymienił Cele do realizacji:

- *„Na podstawie aktualnego stanu literatury opracowane będą nowe rozwiązania falowników dwuczęstotliwościowych, oznaczane w pracy jako 2T1C oraz 3T współpracujące z dwoma transformatorami dopasowującymi, dwuczęstotliwościowym obwodem rezonansowym oraz wzbudnikiem i wsadem"*
- *„Falowniki te będą poddane analizie teoretycznej w celu określenia ich właściwości energetycznych (np. sprawności) i funkcjonalnych (np. właściwości sterowania składowymi mocy MF i HF, możliwości dopasowania)"*
- *„Na potrzeby weryfikacji powyższych właściwości opracowane będą modele laboratoryjne i stanowisko eksperymentalne. Potwierdzone zostaną możliwości dopasowania falownika do obciążenia i niezależnego sterowania mocy składowych MF i HF oraz zakresu sterowania, a także sprawność energetyczna."*
- *„Wykonanie analizy teoretycznej obwodu obciążenia, z określeniem charakterystyk sterowania mocy oraz napięć występujących na kondensatorach rezonansowych."*
- *„Wykonanie analizy strat mocy w tranzystorach mocy na bazie własnego modelu numerycznego bazującego na danych techniczny z karty katalogowej producenta."*
- *„Projekt i wykonanie przekształtnika oraz dobór parametrów obwodu obciążenia."*
- *„Porównanie wartości strat mocy w tranzystorach uzyskanych analitycznie oraz eksperymentalnie – wzajemna weryfikacja modelu numerycznego i pomiarów."*

Treść rozprawy została przedstawiona w 7 rozdziałach:
Rozdział 1: zawiera ogólny opis tematyki, tezę rozprawy, cele badawcze oraz założenia
Rozdział 2: zawiera przegląd literatury zarówno polskiej jak i zagranicznej oraz omówienie bieżącego stanu wiedzy.
Rozdział 3: zawiera opis metody dwuczęstotliwościowego nagrzewania indukcyjnego oraz koncepcje jej wykorzystania do nagrzewania kół zębatych.
Rozdział 4: zawiera obszerną analizę modeli falownika wraz z obciążeniem o strukturach szeregowego oraz szeregowo-równoległego obwodu RLC
Rozdział 5: omawia właściwości falowników rezonansowych o topologiach 2T1C oraz 3T, które stanowią główny obiekt rozważań prowadzonych w ramach rozprawy, oraz prezentuje analizę strat komutacyjnych w odniesieniu do obszaru pracy falowników.
Rozdział 6: zawiera opis stanowiska badawczego, prezentuje oraz omawia wyniki badań eksperymentalnych.
Rozdział 7: zawiera podsumowanie, wnioski końcowe oraz przedstawia proponowane kierunki dalszych badań.

II. Ocena merytoryczna i wykaz najważniejszych osiągnięć Autora

Przedstawioną do oceny rozprawę oceniam pozytywnie. Zawiera oryginalne rozwiązanie niebanalnego problemu naukowego, zrealizowane w pełnym cyklu badawczym: począwszy od przeglądu aktualnego stanu wiedzy, poprzez analizę teoretyczną zweryfikowaną badaniami symulacyjnymi, zaprojektowanie i budowa stanowiska badawczego skończywszy na przeprowadzeniu badań eksperymentalnych. O oryginalności uzyskanych przez doktoranta rezultatów świadczą dwa zgłoszenia patentowe oraz publikacje dotyczące nowych topologii układów z rezonansowymi falownikami dwuczęstotliwościowymi. Na podkreślenie zasługuje również fakt, że uzyskane rezultaty mają potencjał aplikacyjny.

Uważam, że wszystkie Cele postawione we wstępie rozprawy zostały zrealizowane a najważniejsze osiągnięcia doktoranta to:

1. Opracowanie, wyrażonego w jednostkach względnych, uproszczonego modelu analitycznego opisującego charakterystyki impedancji dla obwodu szeregowo-równoległego RLC współpracującego z falownikiem dwuczęstotliwościowym (2F).
2. Modyfikacja topologii układu do nagrzewania dwuczęstotliwościowego poprzez wprowadzenie dwóch transformatorów dopasowujących (topologie 2T1C oraz 3T) umożliwiające na niezależną kontrolę mocy dla składowej średniej częstotliwości (MF) i wysokiej częstotliwości (HF). Zaproponowane przez Doktoranta rozwiązania zostały zgłoszone do Urzędu Patentowego.
3. Przeprowadzenie analizy rozpływu prądów upływu występujących w topologiach 2T1C oraz 3T i zaproponowanie zastępczego modelu obwodowego do wyznaczania wartości tych prądów.

Godny odnotowania jest fakt, że Autor samodzielnie zaprojektował, zbudował i uruchomił rekonfigurowalne stanowisko umożliwiające przeprowadzenie badań eksperymentalnych dla wszystkich opisywanych topologii. Stanowisko bazuje na modułach pomostków zbudowanych w oparciu o tranzystory MOSFET z węglika krzemu pozwalające na uzyskanie wysokich sprawności dla częstotliwości przełączania rzędu kilkuset kHz. Uruchomienie takiego układu oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych świadczy o dużych umiejętnościach praktycznych doktoranta.

Ogólna ocena rozprawy jest pozytywna, niemniej jednak w trakcie lektury nasuwają się również wątpliwości oraz uwagi krytyczne, które zostały sformułowane w rozdziale III niniejszej recenzji.

III. Uwagi dyskusyjne i komentarze do rozprawy

W trakcie lektury rozprawy pojawiło się szereg uwag i wątpliwości, do których Autor powinien się ustosunkować. Ich lista została zamieszczona poniżej.

1. W rozdziale 3 (strona 22) Autor pisze:
„W objętości przypowierzchniowej (od powierzchni do głębokości δ) wydziela się 86,5% ciepła generowanego przez przepływ prądów wirowych. Dla głębokości 3δ jest to 96%" .

W przypadku głębokości wnikania 3δ wartość ta wynosi 99.75% a nie jak podaje Autor 96% (wartość 96% odnosi się do parametru jakim jest gęstość prądu co pokazuje rysunek 3.2)

2. W rozdziale 3 na stronie 23 Autor pisze:
„Założono, że na rezystancję zastępczą układu wzbudnik-wsad wprost proporcjonalnie wpływa głębokość wnikania."

Według wzoru 3.4 rezystancja jest proporcjonalna do pierwiastka z pulsacji względnej :

$$R = R_0\sqrt{\omega^*} \qquad (3.4)$$

gdzie:

R_0 – wartość zastępczej rezystancji przy pulsacji rezonansowej obwodu.

Z kolei ze wzoru 3.3:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \qquad (3.3)$$

Wynika, że głębokość wnikania jest odwrotnie proporcjonalna do pulsacji.

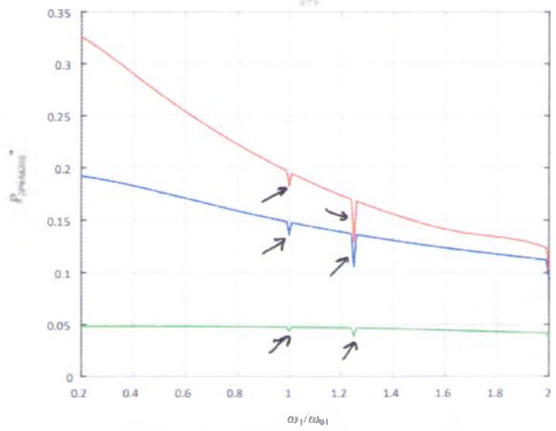
W związku z tym, po podstawieniu we wzorze 3.4 za wartość pulsacji przekształconego wyrażenia 3.3 wynika, że rezystancja zastępcza układu jest odwrotnie proporcjonalna do głębokości wnikania, a nie jak w napisano w tekście „wprost proporcjonalna"

3. W rozdziale 4, na stronie 37, Autor podaje wzór na napięcie prostokątne w postaci szeregu Fouriera:

$$e(t) = \frac{4E}{\pi}\sum_{h=1}^{\infty}\frac{1}{2h-1}\sin((2h-1)\omega t) \qquad (4.26)$$

W dalszej części tekstu posługuję się pojęciem h-tej harmonicznej przebiegu napięcia co błędem gdyż we wzorze 4.26, h zostało zdefiniowane jako liczba naturalna od 1 do nieskończoności natomiast po rozkładzie w szereg Fouriera przebiegu prostokątnego, występują w nim tylko harmoniczne o wartościach 2h-1

4. W rozdziale 4, strona 53 , na charakterystykach sterowania zamieszczonych na rysunkach 4.16 pojawiają się anomalia (zaznaczone na zamieszczonej poniżej kopii rysunku).



Rys. 4.16. Charakterystyki sterowania mocy składowej HF w funkcji pulsacji sygnału modulującego dla trzech wartości dobroci Q_2 obwodu 2F [$k_R = 0,1$, $k_1 = k_C = 10$, $M = 0,9$, $\omega_S/\omega_{01} = \text{const} = 5$, $P_{2FHF}^{*} = f(\omega_1)$], wyznaczone z wykorzystaniem względnych impedancji odniesionych do: (a) rezystancji R_2, (b) impedancji charakterystycznej Z_{02}

W dalszej części rozprawy, na stronie 63 przy okazji opisu rysunku 4.24, Autor umieszcza krótki komentarz i można się domyślić, że dotyczy to również rysunku 4.16. Uważam jednak, że dla zwiększenia czytelności pracy komentarz taki powinien znaleźć się również przy opisie rysunku 4.16 Proszę Autora o bardziej szczegółowe wyjaśnienie jaka jest przyczyna anomalii na wspomnianych charakterystykach.

5. W podsumowaniu rozdziału 4, na stronie 67 Autor pisze:

„Przedstawiono źródła zasilania w postaci szeregu Fouriera dla metod FM oraz PWM". Jest to oczywiście skrót myślowy, lecz w tekstach o charakterze naukowym należy zadbać o precyzję wypowiedzi i zdanie mogło by mieć na przykład następujące brzmienie: Falownik napięciowy sterowany metodą FM i PWM przedstawiono jako źródło napięcia, którego przebieg zdefiniowano w postaci szeregu Fouriera.

6. W rozdziale 5 (strony 69-70), na rys.5.3-5.6 prezentujących rozpływ prądów w falowniku, Autor stosuje oznaczenia kolorystyczne. Uważam, że należałoby dołożyć legendę z opisem znaczenia poszczególnych kolorów.

7. W rozdziale 5, na stronie 73 Autor pisze:

„Jest to iloraz wartości prądu upływu i_{up} oraz prądu składowej wysokiej częstotliwości i_{2w} płynącego przez wzbudnik sprowadzonych na stronę pierwotną"

Należałoby uściślić o jakie wartości prądu chodzi: skuteczne, średnie, amplitudowe.

8. W rozdziale 5, na stronie 87 została przedstawiona analiza strat mocy w szeregowym falowniku rezonansowym o topologii H4. Wykorzystano do tego model zbudowany w środowisku MATLAB, który jednak nie został przez Autora dokładnie opisany (szczegółowo opisano jedynie sposób parametryzacji danych wejściowych do obliczeń uzyskanych z not katalogowych tranzystorów).

W związku z powyższym proszę o przedstawienie szczegółów dotyczących samego modelu falownika oraz metody i parametrów przyjętych przy wykonywaniu obliczeń.

9. Na oscylogramach prezentujących wyniki badań laboratoryjnych dla układu o topologii 2T1C dla przypadku pracy poliharmonicznej oraz monoharmonicznej MF (rys. 6.15 i 6.20), w przebiegu napięcia wyjściowego *u1* i *u2* wyraźnie widać efekt rozładowania kondensatorów w dzielniku pojemnościowym. W pracy nie znaleziono informacji jakie kryterium przyjęto przy doborze pojemność tych kondensatorów i jaką miała ona wartość w trakcie eksperymentu (w treści rozprawy nigdzie nie podano parametrów tych kondensatorów). Autor nie skomentował również jaki wpływ na funkcjonalność układu o topologii 2T1C ma zastosowanie dzielnika pojemnościowego.

10. W rozdziale 6 na stronie 112 Autor pisze:

„Jeżeli harmoniczne te biorą udział w przenoszeniu mocy do obciążenia……"

Sformułowanie „przenoszenie mocy" jest niepoprawne. Fragment powinien brzmieć ... biorą udział w transferze energii do obciążenia.

11. W podsumowaniu rozdziału 6, w tabeli 6.6, Autor zamieszcza zestawienie wybranych właściwości wszystkich trzech analizowanych topologii falowników: 2T, 2T1C, 3T. We wspomnianej tabeli brakuje informacji odnośnie wad i zalet trzech analizowanych topologii falowników w kontekście takich parametrów jak: ilość zastosowanych podzespołów, stresy napięciowe i prądowe na elementach, funkcjonalność, stopień komplikacji układu, właściwości regulacyjne itd.

12. Na stronie 6 rozprawy doktorskiej Autor umieścił Wykaz Ważniejszych Oznaczeń co jest rzeczą godną pochwały, niestety zestaw ten jest bardzo ubogi w stosunku do ilości wzorów i wyprowadzeń, które zawiera praca. Prawdopodobnie, zakładając istnienie wykazu, Autor nie umieszcza opisów symboli pod prezentowanymi wzorami co w połączeniu z niekompletnym Wykazem Ważniejszych Oznaczeń znacznie utrudnia czytanie pracy. I tak np. we wzorze (5.1) pojawiają się współczynniki k_L i k_C, których interpretacji czytelnik musi doszukać się w tekście (str. 33).

Stronę redakcyjną i edytorską rozprawy należy ocenić pozytywnie, jednak Autor nie ustrzegł się pewnych błędów literowych i stylistycznych, z których część wymieniam poniżej:

str. 106 : Rysunki 6.14 oraz 6.41 mogły się ograniczyć do części b) – część a) jest powielona w części b)

Str. 116: Dla ułatwienia analizy charakterystyk, osie x na rys. 6.32-6.34 powinny mieć jednakowo zdefiniowany początek (6kHz)

Str. 42.

> Skorelowane jest to z występowaniem minimum impedancji dla tej pulsacji. Na rysunku 4.10 zaprezentowano analogiczne charakterystyki dla wymuszenia napięciem o kształcie prostokątny. Istnieje kilka ekstremów mocy. Widoczne są również lokalne maksima m.in. dla

Str. 71.

> Przedstawiona na rysunku 5.8 topologia 3T zawiera trzy gałęzi tranzystorowe, z których jedna

Str. 100

> nagrzewał się podczas pracy układu. Na wartość indukcyjności L_2, wyznaczanej na potrzeby modelu obwodowego na podstawie częstotliwości rezonansowej, wpływały szeregowe ze wzbudnikiem indukcyjności rozproszenia transformatora Tr_2, który był modyfikowany.

IV. Podsumowanie oceny rozprawy doktorskiej i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Kierepki „Analiza i badania dwuczęstotliwościowych falowników rezonansowych do nagrzewania indukcyjnego" stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie ważnego technicznie i nie trywialnego teoretycznie problemu badawczego. Sformułowana na wstępie teza została dowiedziona a wszystkie postawione przez Doktoranta cele zrealizowane.

Na tej podstawie stwierdzam, że praca spełnia warunki i 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.

W związku z powyższym, stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Kierepki do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej .

.....