

Dr hab. in . Joanna Pawłat
Zemborzyce Podle ne 123A
20-515 Lublin
Tel.: 514907373
E-mail: j.pawlat@pollub.pl

Lublin, 25.08.2020

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr in . Jacka Kołka

Tytuł rozprawy doktorskiej:

„Rezonansowy, półprzewodnikowy generator impulsów wysokiego napięcia do wytwarzania plazmy nietermicznej”

Niniejszą recenzję wykonałam na prośbę Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie reprezentowanego przez Prorektora do spraw nauki Pana prof. dr hab. in . Jacka Przepiórskiego.

Recenzję sporządziłam na podstawie przepisów dotyczących postępowania w przewodzie doktorskim, a w szczególności Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789); Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668, z późn. zm.) oraz zgodnie z rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora.

Do zrecenzowania przedstawiono mi rozprawę doktorską Pana mgr in . Jacka Kołka pt. „Rezonansowy, półprzewodnikowy generator impulsów wysokiego napięcia do wytwarzania plazmy nietermicznej”. Promotorem pracy jest Pan dr hab. in . Marcin Hołub, profesor Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

1. Ocena rozprawy doktorskiej

Podczas swej pracy naukowej Kandydat podjął tematykę związaną z zastosowaniem rezonansowych, energoelektronicznych generatorów impulsów wysokiego napięcia do zasilania komór wyładowczych reaktorów plazmy niskotemperaturowej.

Rozprawa doktorska pt. „Rezonansowy, półprzewodnikowy generator impulsów wysokiego napięcia do wytwarzania plazmy nietermicznej” została przygotowana w języku polskim, zawiera ona 111 stron wraz ze spisem literatury, na których w zadawalający sposób zostały opisane badania Kandydata dotyczące autorskiego układu przekształtnika tranzystorowego wysokiego napięcia. Praca zawiera bogaty spis cytowanej literatury złożony z 197 pozycji.

Rozdział 1 (6 stron) stanowi krótki wstęp uzasadniający podjęcie problematyki zaproponowanej w pracy, przedstawia też, cel i zakres pracy. W rozdziale tym syntetycznie opisano metody badań, przybliżono również terminologię i podano wykaz oznaczeń.

Rozdział 2 (11 stron) prezentuje zagadnienia związane ze źródłami plazmy nietermicznej omawiając wybrane typy reaktorów plazmowych i sposoby ich zasilania. Kandydat szczególnie uwzględnił reaktory koronowe – w swej konstrukcji pozbawionym warstwy stałego dielektryka oraz plazmotronom z barier dielektrycznymi. Przedstawione zostały podstawowe założenia dotyczące ich budowy i zasady działania, schematy zastępcze, przytoczone są przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe oraz wybrane parametry elektryczne wyładowania przy ciśnieniu atmosferycznym. Autor dokonuje tu też przeglądu wybranych rozwiązań konstrukcyjnych zasilaczy wysokiego napięcia do generowania plazmy nierównowagowej takich jak zasilacze DC, AC/DC oraz omówione szerzej zasilacze impulsowe: z układami kompresji magnetycznej, z liniami długimi, z rozwiązaniem kaskadowym oraz z transformatorami podwyższającymi napięcie.

Rozdział 3 (2 strony) jest niezwykle istotny, gdy w sposób syntetyczny przedstawia proponowaną topologię zasilacza wysokiego napięcia, parametry generowanej fali napięciowej (czas trwania impulsu poniżej 10 μ s, maksymalna amplituda minimum 20 kV, regulowana częstotliwość 250 Hz-2 kHz). Uniwersalny zasilacz z możliwością zastosowania w przypadku wyładowań koronowych i barierowych ma bazowaną na transformatorze typu Tesla o obniżonym współczynniku sprężenia magnetycznego oraz półprzewodnikowych elementach przełączalnych. Ma on cechować się m. in. regulowaną mocą wyjściową, rezonansową pracą w trybie zero-current switching (ZCS) bez względu na obciążenie,

bipolarnym kształtem generowanego impulsu o średniej wartości napięcia pojedynczego impulsu równej 0 V, odpornością na wyładowania oraz zwarcia w stanie obciążenia a także prostotę konstrukcji, dostępności komponentów oraz skalowalności. Zaproponowana topologia zasilacza obejmuje: źródło napięcia stałego w postaci komercyjnego laboratoryjnego zasilacza impulsowego TDK Lambda GEN600-2.6; rezonansowy układ ładowania pojemności oraz rezonansowy układ kształtowania impulsu.

W najbardziej cennych dla rozprawy Rozdziałach 4 - 8 opisano szczegółowo zaproponowane przez Kandydata elementy topologii zasilacza dla generatorów plazmy niskotemperaturowej, podano podstawy teoretyczne, zaprezentowano prototyp zasilacza i jego charakterystyki elektryczne. Ponadto przytoczono wyniki badań dotyczących plazmowego systemu dezodoryzacji osadów ciekowych oraz produkcji ozonu z zastosowaniem zaproponowanego prototypu zasilacza wysokiego napięcia.

Rozdział 4 (11 stron) stanowi opracowanie dotyczące drugiego elementu topologii zasilacza wysokiego napięcia: rezonansowego układu ładowania pojemności złożonego z dwóch szeregowych obwodów rezonansowych RLC połączonych w sposób kaskadowy przez wspólną pojemność (C_1) oraz tranzystorów i diod odcinających. W proponowanym układzie tranzystory pracują w trybie przełączania przy zerowym prądzie (ZCS) zapewniając możliwość wysokiej sprawności. Układ ten gromadzi w polu elektrycznym baterii kondensatorów (C_2) energię do wygenerowania pojedynczego impulsu napięciowego za proces przekazywania porcji energii ze źródła napięcia stałego (U_d) do pojemności wyjściowej (C_2) odbywa się w trzech cyklicznie powtarzanych interwałach czasowych. Maksymalna energia pojedynczego generowanego impulsu napięciowego wynika z wartości napięcia kondensatora (C_2) regulowana jest poprzez liczbę powtórzeń procesu ładowania. Kandydat podaje uproszczone schematy zastępcze układu ładowania dla pierwszego, drugiego i trzeciego interwału czasowego i w sposób analityczny przybliża podstawowe parametry pracy układu w danym stanie m.in.: dobro układu, czas trwania interwału, napięcie na kondensatorze, maksymalny prąd, sprawność, itd. Autor dokonuje doboru komponentów dla rezonansowego układu ładowania pojemności przy założonej maksymalnej wartości napięcia zasilania (U_{dmax}) 650 V, wyznacza szczytowe napięcie i maksymalne wartości prądu dla elementów półprzewodnikowych, maksymalną moc ciągłą układu ładowania oraz determinuje całkowitą dostępną długość przedziału czasowego dla procesu ładowania baterii kondensatorów (C_2) dbając przy tym o zapewnienie elastycznej pracy

układu poprzez możliwość zwiększenia czułości liczyby cykli ładowania dla pojedynczego impulsu wyjściowego. Następnie przedstawione są wyniki symulacji wskazujące m.in. na potrzebę nieznacznej zmiany liczyby cykli ładowania w stosunku do wyznaczonej wartości teoretycznej, co wynika ze strat rezystancyjnych w danym obwodzie. Podsumowaniem Rozdziału 4 jest zaprezentowanie wykonanego prototypu rezonansowego układu zasilania wraz z zestawieniem parametrów wykorzystanych komponentów i dokumentacją zdjęciową. W celu minimalizacji strat energetycznych elementy półprzewodnikowe bazują na węgliku krzemu.

Rezonansowy układ kształtowania impulsu wyjściowego w oparciu o transformator typu Tesla z rdzeniem magnetycznym o ograniczonym zewnętrznym polu magnetycznym opisano w Rozdziale 5 (20 stron). Zaproponowano wielordzeniowy impulsowy transformator podwyższenia napięcia wraz z dodatkowymi elementami indukcyjnymi i dokonano przeglądu możliwości konfiguracji rdzeni magnetycznych do budowy transformatora o obniżonym współczynniku sprzężenia magnetycznego (k). Wykonano także od k symulacje mające na celu określenie maksymalnego transferu energii z pojemności wyjściowej rezonansowego układu ładowania C_2 do pojemności wyjściowej zasilacza C_3 z udziałem transformatora; maksymalnej energii oscylacji szczytowych; przebiegu napięcia wyjściowego układu. Zaproponowano schemat zastępczy dla układu kształtowania impulsu i po wstępnej analizie teoretycznej dobrano podstawowe parametry pracy układu zakładając wartość przekładni zwojowej transformatora $N=50$ oraz współczynnik sprzężenia magnetycznego $k=0,6$. Zaproponowano siedem rdzeni magnetycznych: trzy rdzenie stanowiące transformator T_1 oraz dwie dwurdzeniowe pary imitujące indukcyjności rozproszenia strony pierwotnej i wtórnej transformatora; dobrano również elementy półprzewodnikowe. W programie Plecs Kandydat wykonał symulacje przebiegów prądów i napięć w układzie kształtowania impulsu jak również charakterystyk czułościowo-amplitudowych układu pracującego z obciążeniem dla schematów zastępczych odzwierciedlających pracę reaktora plazmowego z wyładowaniem koronowym i barierowym. Autor wskazuje, że maksymalna procentowa zmiana podstawowej czułości rezonansowej przy dwukrotnym wzroście pojemności obciążenia typu korona wynosi tylko 26% co jest wynikiem lepszym niż w przypadku wikszości dostępnych konstrukcji rezonansowych. Przy czterokrotnym wzroście pojemności obciążenia typu bariera dielektryczna zmiana ta wynosi zaledwie 18% dla czułości podstawowej f_1 . Następnie wykonano modele 3D rzeczywistych konstrukcji transformatorów: powietrznego

transformatora typu Tesla, transformatora typu Tesla z rdzeniem magnetycznym ze szczelin rozproszon (oba o wymiarach zbli onych do transformatora zaproponowanego przez Kandydata) oraz transformatora proponowanej konstrukcji. Metod elementów sko czonych dokonano symulacji obwodu magnetycznego dla powy szych transformatorów uzyskuj c widoki wektora pola magnetycznego w dwóch przekrojach oraz nat enia pola magnetycznego w przestrzeni transformatorów. W proponowanym rozwi zaniu pomimo najmniej równomiernego rozkładu nat enia pola magnetycznego w porównaniu do pozostałych analizowanych przypadków korzystnie obni ono jego warto w otoczeniu transformatora (o ok. 45 razy w porównaniu do transformatora powietrznego i ok. 15 razy w stosunku do transformatora z rdzeniem magnetycznym ze szczelin rozproszon). W wyniku symulacji dla konstrukcji zaprojektowanej przez Kandydata otrzymano parametry układu zbli one do zało e teoretycznych. W podsumowaniu rozdziału zostały przedstawione parametry poszczególnych komponentów oraz dokumentacja zdj ciowa wykonanego prototypu układu kształtowania impulsu.

Rozdział 6 (17 stron) przedstawia wyniki bada laboratoryjnych wykonanego prototypowego impulsowego zasilacza wysokiego napi cia maj ce na celu weryfikacj wyników uzyskanych podczas symulacji. Do sterowania i kontroli zastosowano procesor sygnałowy TMS320F28027FPTT (Texas Instruments). U ytkownik mo e samodzielnie regulowa takie parametry jak napi cie szyny wej ciowej (0-650V), liczb cykli ładowania rezonansowego (0-40 cykli), cz stotliwo powtarzania impulsu wyj ciowego (250 Hz- 2 kHz) oraz czas zał czania tranzystora S_3 (0-10 μ s, rozdzielczo 50 ns). Pomierzone przebiegi pr dów i napi układu ładowania dla napi cia zasilania 400 V były zbli one do symulowanych przebiegów. Ze wzgl du na zastosowane rozwi zania konstrukcyjne zasilacza, dostrojenia układu kształtowania impulsu i nast pnie jego badania dla napi cia początkowego pojemno ci C_2 równego 400 V wykonano w funkcji zmiennej pojemno ci C_3 (w postaci drabinki pojemno ciowej zło onej z wielu kondensatorów typu FKP (Wima)). Pomierzono amplitudy napi cia wyj ciowego i oscylacji szcz tkowych, sprawno procesu generacji impulsu wyj ciowego oraz przebiegi pr dów i napi układu kształtowania impulsu przy stałej pojemno ci C_2 równej 1 μ F oraz zmiennej pojemno ci C_3 . Autor zwraca uwag na negatywny wpływ paso ytnicznych pojemno ci transformatora wysokiego napi cia widoczny w postaci dodatkowych oscylacji na badanych przebiegach pr dowych. W kolejnych krokach na podstawie pomiarów wyznaczono sprawno ci układu

ładowania, układu wyjściowego zasilacza oraz sprawność całkowitą urządzenia i sporządzono charakterystyki powyższych sprawności dla prototypu zasilacza w funkcji napięcia szyny zasilającej U_d . Całkowita sprawność maksymalna dla $U_d = 400$ V wynosi 72%. Kandydat oszacował również straty energii w urządzeniu, którego sprawność zależy przede wszystkim od układu wyjściowego z transformatorem typu Tesla, gdzie generowana jest znaczna część strat. Autor dokonał pomiarów parametrów pracy zasilacza prezentując przebiegi prądu, napięcia, mocy i energii przy obciążeniu rzeczywistym dla dwustufigowego reaktora koronowego ze szczelin wyładowczych 25 mm przy pracy z mociami mniejszymi niż 1W, 50W oraz w stanie zwarcia (łuk elektryczny). Obciążenie typu barierowego stanowił trzydziestoseciokomorowy plazmotron z cylindrycznymi barierami z dielektrykiem z tlenku aluminium z umieszczoną wewnątrz elektrodą wysokonapięciową w postaci pręta oraz zespołem perforowanych blach, pełniących rolę elektrody niskonapięciowej. Przebiegi prądu, napięcia, mocy i energii dla pracy plazmotronu sporządzono odpowiednio dla pojemności $C_3 = 130$ pF oraz 215 pF. Przy braku tej pojemności zbadano pracę w obciążeniu plazmotronem wykonanym z 47 połączonych równolegle rur kwarcowych wraz z nawiniętymi wewnątrz i na zewnątrz elektrodami ze stali nierdzewnej gdzie przy pracy z mocią 100 W obserwowano głównie wyładowania jarzeniowe.

W Rozdziale 7 (5 stron) Autor zaproponował dodatkowy element układu do generacji napięcia typu AC/DC dołączany pomiędzy wyjściem zasilacza wysokiego napięcia a odbiornikiem, szczególnie przydatny w plazmotronach bez bariery dielektrycznej takich jak np. elektrofiltry i pozwalający na zwiększenie amplitudy napięcia i osi gęstości wyszczepienia energii dostarczanych do generatora plazmy. Prototyp poddano testom i uzyskano przebiegi prądu, napięcia, mocy i energii dla wyżej opisanego reaktora koronowego. W tym elemencie zaproponowanego układu jest dołączona szeregowo do obwodu wyjściowego zasilacza pojemność C_4 , której wartość w znacznym stopniu determinuje ilość dostarczonej energii poprzez wpływ na wartość prądu. Odpowiedni dobór tej pojemności pozwala na ograniczenie maksymalnej mocy dostarczonej do reaktora a przez to również ograniczenie energii zwarcia i skrócenie czasu jego wygaszenia.

Rozdział 8 (6 stron) przedstawia przykłady zastosowania zasilacza dla dwusekcyjnego, rurowego reaktora plazmowego bez bariery dielektrycznej pracującego w systemie dezodoryzacji dla instalacji kompostowania osadu ciekowego. Badania te przeprowadzone były w ramach projektu STEP. Autor opisuje schemat instalacji pilotażowej, podaje wyniki

pomiarów prądu, napięcia, mocy i energii oraz wyniki pomiarów chemicznych efektywności dezodoryzacji plazmowej na przykładzie stężenia amoniaku, siarkowodoru, heksanu, disulfidu dimetylowego, 1-metoksypropan-2-olu, toluenu, pentanu, 2-metylobutanalu oraz benzenu. W przypadku pierwszych sześciu związków ich stężenia uległy widocznemu zmniejszeniu jednak odnotowano również znaczny wzrost stężenia benzenu. Kandydat zastosował również prototypowy zasilacz w ozonatorze opartym na konstrukcji plazmotronu z bariera dielektryczną z tlenku aluminium. Pomierzono sprawność produkcji ozonu w zależności od częstotliwości powtarzania impulsów wysokiego napięcia oraz od mocy wyładowania.

Rozdział 9 (2 strony) zawiera podsumowanie wyników pracy, które potwierdziły możliwość zastosowania prototypowego, rezonansowego, impulsowego zasilacza wysokiego napięcia do zasilania rzeczywistych generatorów plazmy nietermicznej.

Mgr inż. Jacek Kołek zrealizował wyznaczony cel badawczy opracowując nową topologię przekształtnika, za parametry pracy wykonanego urządzenia zbliżone do zakładanych. W mojej opinii postawiona teza została potwierdzona.

Uwagi redakcyjne:

- Kompozycja pracy jest przejrzysta, lecz korzystne byłoby zamieszczenie streszczenia w języku polskim i angielskim oraz opisu dorobku naukowego Kandydata.
- Język pracy jest poprawny i zrozumiały. Kandydat nie ustrzegł się drobnych błędów edytorskich, jednak są one nieliczne i nie wpływają znacząco na jakość pracy.
- Dla przyszłych użytkowników zasilacza przydatna byłaby podsumująca, zbiorcza informacja dotycząca oferowanych parametrów pracy a także jego wymiarów, wagi oraz przybliżonego kosztu produkcji.

Rozprawę doktorską mgr inż. Jacka Kołka oceniam bardzo dobrze. Rozprawa nie budzi zastrzeżeń merytorycznych i ma wkład w rozwój nauki rozszerzając istniejącą wiedzę w zakresie nowych rozwiązań topologicznych zasilaczy przeznaczonych dla generatorów plazmy. Analiza wyników pracy umożliwia identyfikację kolejnych interesujących zagadnień badawczych.

Pragnę zadać Kandydatowi następujące pytania:

1. Jak w ocenie Kandydata przedstawia się prototypowy zasilacz w porównaniu z zasilaczami impulsowymi już dostępnymi na rynku? Co jest jego główną zaletą, jakie są wady? Jaki mógłby być jego koszt?
2. Jakie w opinii Kandydata byłyby najprostsze do wprowadzenia modyfikacje układu prototypowego tak by zminimalizować wpływ pasywnych elementów związanych z transformatorem wysokiego napięcia na pracę zasilacza?
3. Czy podczas pracy proponowanego przekształtnika mierzono temperatury jonizowanego gazu np. na wylocie któregoś z reaktorów?

2. Osiągnięcia naukowo-badawcze Kandydata

Poniżej prezentuję dotychczasowe osiągnięcia naukowo-badawcze Kandydata:

W bazie Web of Science i Scopus znajdują się 3 publikacje autorstwa mgr inż. Jacka Kołki, cytowane według WoS i Scopus odpowiednio 1 oraz 3 razy. Według WoS h-index dla znajdujących się w tej bazie publikacji wynosi 1 (stan na 25.08.2020).

Na szczególną uwagę zasługuje publikacja w czasopiśmie naukowym *Applied Sciences* o międzynarodowym zasięgu (IF 2.474) pt. "Practical Design of a High-Voltage Pulsed Power Supply Implementing SiC Technology for Atmospheric Pressure Plasma Reactors" z 2019 r.

Mgr inż. Jacek Kołek jako uczestnik studiów doktoranckich w dyscyplinie elektrotechnika został laureatem programu stypendialnego Prezydenta Miasta Szczecin w 2020 r.

Z rozdziału 8.1. przedstawionej pracy wynika, że Kandydat brał udział w międzynarodowym projekcie STEP (Sludge Technological, Ecological Progress) w ramach Interreg South Baltic Programme, za prototyp jego zasilacza był wykorzystany w pilotażowym systemie dezodoryzacji dla instalacji kompostowania osadu ciekowego w przedsiębiorstwie Goleniowskie Wodociągi i Kanalizacja - co świadczy o znaczących walorach aplikacyjnych tej pracy.

3. Wnioski końcowe

Przedstawiona rozprawa doktorska Kandydata pt. „Rezonansowy, półprzewodnikowy generator impulsów wysokiego napięcia do wytwarzania plazmy nietermicznej” przygotowana pod opiekę promotora Pana dr hab. inż. Marcina Hołuba, prof. ZUT w pełni odpowiada warunkom określonym w odpowiednich aktach prawnych w szczególności w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789) oraz Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668, z późn. zm.).

Rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego poprzez opracowywanie nowej topologii rezonansowego, impulsowego zasilacza wysokiego napięcia. Wyniki prowadzonych badań stanowią istotny wkład w rozwój nauki mający jednocześnie dużą wartość użytkową.

Warsztat naukowy Kandydata jest wystarczający do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.

Podsumowując, w mojej ocenie **Kandydat spełnia wymagania, jakie zgodnie z przepisami zacytowanymi na początku niniejszej recenzji muszą spełniać kandydaci do stopnia doktora.**

Wnoszę o przyjęcie niniejszej pracy jako rozprawy doktorskiej i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Jacka Kołka do publicznej dyskusji nad przedłożoną pracą.



/Dr hab. inż. Joanna Pawłat, prof. LUT/