Lublin, 25.08.2020

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

**RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. 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. inż. 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 inż. Jacka Kołka
pt. „Rezonansowy, półprzewodnikowy generator impulsów wysokiego napięcia do wytwarzania plazmy nietermicznej”. Promotorem pracy jest Pan dr hab. inż. 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 tezę, cel i zakres pracy. W rozdziale tym syntetycznie opisano metodykę 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 szczególną uwagę poświęca reaktorom koronowym- w swej konstrukcji pozbawionym warstwy stałego dielektryka oraz plazmotronom z barierą dielektryczną. Przedstawione zostają 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 linią długą, z rozwiązaniem kaskadowym oraz
z transformatorami podwyższającymi napięcie.

Rozdział 3 (2 strony) jest niezwykle istotny, gdyż w sposób syntetyczny przedstawia proponowaną topologię zasilacza wysokiego napięcia, parametry generowanej fali napięciowej (czas trwania impulsu poniżej 10 ms, maksymalna amplituda minimum 20 kV, regulowana częstotliwość 250 Hz-2 kHz). Uniwersalny zasilacz z możliwością zastosowania w przypadku wyładowań koronowych
 i barierowych ma bazować na transformatorze typu Tesla o obniżonym współczynniku sprzężenia 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 prostotą konstrukcji, dostępnością komponentów oraz skalowalnością. 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 ściekowych 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 dwu szeregowych obwodów rezonansowych *RLC* połączonych w sposób kaskadowy przez wspólną pojemność (*C1*) oraz tranzystorów i diod odcinających. W proponowanym układzie tranzystory pracują w trybie przełączania przy zerowym prądzie (ZCS) zapewniając możliwie wysoką sprawność. Układ ten gromadzi w polu elektrycznym baterii kondensatorów *(C2)* energię do wygenerowania pojedynczego impulsu napięcia wyjściowego zaś proces przekazywania porcji energii ze źródła napięcia stałego *(Ud)* do pojemności wyjściowej *(C2)* odbywa się w trzech cyklicznie powtarzanych interwałach czasowych. Maksymalna energia pojedynczego generowanego impulsu wyjściowego wynikająca z wartości napięcia kondensatora *(C2)* 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.: dobroć układu, czas trwania interwału, napięcie na kondensatorze, maksymalną wartość prądu, sprawność, itd. Autor dokonuje doboru komponentów dla rezonansowego układu ładowania pojemności przy założonej maksymalnej wartości napięcia zasilania *(Udmax)* 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 *(C2)* dbając przy tym o zapewnienie elastycznej pracy układu poprzez możliwość zwiększenia częstotliwości bądź liczby cykli ładowania dla pojedynczego impulsu wyjściowego. Następnie przedstawione są wyniki symulacji wskazujące m.in. na potrzebę nieznacznego zwiększenia liczby 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 łączeniowych 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 podwyższający napięcie wraz z dodatkowymi elementami indukcyjnymi i dokonano przeglądu możliwości konfiguracji rdzeni magnetycznych do budowy transformatora o obniżonym współczynniku sprzężenia magnetycznego *(k).* Wykonano zależne od *k* symulacje mające na celu określenie maksymalnego transferu energii z pojemności wyjściowej rezonansowego układu ładowania *C2* do pojemności wyjściowej zasilacza *C3* z udziałem transformatora; maksymalnej energii oscylacji szczątkowych; 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 *T1* 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 częstotliwościowoamplitudowych układu pracującego z obciążeniem dla schematów zastępczych odzwierciedlających pracę reaktora plazmowego z wyładowaniem koronowym i barierowym. Autor wskazuje, że maksymalna procentowa zmiana podstawowej częstotliwości rezonansowej przy dwukrotnym wzroście pojemności obciążenia typu korona wynosi tylko 26% co jest wynikiem lepszym niż w przypadku większości dostępnych konstrukcji rezonansowych. Przy czterokrotnym wzroście pojemności obciążenia typu bariera dielektryczna zmiana ta wynosi zaledwie 18% dla częstotliwości podstawowej *f*1. Następnie wykonano modele 3D rzeczywistych konstrukcji transformatorów: powietrznego transformatora typu Tesla, transformatora typu Tesla z rdzeniem magnetycznym ze szczeliną rozproszoną (oba o wymiarach zbliżonych do transformatora zaproponowanego przez Kandydata) oraz transformatora proponowanej konstrukcji. Metodą elementów skończonych dokonano symulacji obwodu magnetycznego dla powyższych transformatorów uzyskując widoki wektora pola magnetycznego w dwóch przekrojach oraz natężenia pola magnetycznego
w przestrzeni transformatorów. W proponowanym rozwiązaniu pomimo najmniej równomiernego rozkładu natężenia pola magnetycznego w porównaniu do pozostałych analizowanych przypadków korzystnie obniżono jego wartość w otoczeniu transformatora (o ok. 45 razy w porównaniu do transformatora powietrznego i ok. 15 razy w stosunku do transformatora z rdzeniem magnetycznym ze szczeliną rozproszoną). W wyniku symulacji dla konstrukcji zaprojektowanej przez Kandydata otrzymano parametry układu zbliżone do założeń teoretycznych.
W podsumowaniu rozdziału zostały przedstawione parametry poszczególnych komponentów oraz dokumentacja zdjęciowa wykonanego prototypu układu kształtowania impulsu.

Rozdział 6 (17 stron) przedstawia wyniki badań laboratoryjnych wykonanego prototypowego impulsowego zasilacza wysokiego napięcia mające na celu weryfikację wyników uzyskanych podczas symulacji. Do sterowania i kontroli zastosowano procesor sygnałowy TMS320F28027FPTT (Texas Instruments). Użytkownik może samodzielnie regulować takie parametry jak napięcie szyny wejściowej (0-650V), liczbę cykli ładowania rezonansowego (0-40 cykli), częstotliwość powtarzania impulsu wyjściowego (250 Hz- 2 kHz) oraz czas załączania tranzystora *S3* (0-10ms, rozdzielczość 50 ns). Pomierzone przebiegi prądów i napięć układu ładowania dla napięcia zasilania 400 V były zbliżone do symulowanych przebiegów. Ze względu na zastosowane rozwiązania konstrukcyjne zasilacza, dostrojenia układu kształtowania impulsu i następnie jego badania dla napięcia początkowego pojemności *C2* równego 400 V wykonano w funkcji zmiennej pojemności *C3*(w postaci drabinki pojemnościowej złożonej z wielu kondensatorów typu FKP (Wima)). Pomierzono amplitudy napięcia wyjściowego i oscylacji szczątkowych, sprawność procesu generacji impulsu wyjściowego oraz przebiegi prądów i napięć układu kształtowania impulsu przy stałej pojemności *C2* równej 1mF oraz zmiennej pojemności *C3*. Autor zwraca uwagę na negatywny wpływ pasożytniczych pojemności transformatora wysokiego napięcia widoczny w postaci dodatkowych oscylacji na badanych przebiegach prądowych. W kolejnych krokach na podstawie pomiarów wyznaczono sprawności układu ładowania, układu wyjściowego zasilacza oraz sprawność całkowitą urządzenia i sporządzono charakterystyki powyższych sprawności dla prototypu zasilacza w funkcji napięcia szyny zasilającej *Ud*. Całkowita sprawność maksymalna dla *Ud* =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 dwustuiglicowego reaktora koronowego ze szczeliną wyładowczą 25 mm przy pracy z mocą mniejszą niż 1W, 50W oraz w stanie zwarcia (łuk elektryczny). Obciążenie typu barierowego stanowił trzydziestosześciokomorowy 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 *C3* = 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 mocą 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 osiąganie wyższych wartości energii dostarczanych do generatora plazmy. Prototyp poddano testom i uzyskano przebiegi prądu, napięcia, mocy i energii dla wyżej opisanego reaktora koronowego. Ważnym elementem zaproponowanego układu jest dołączona szeregowo do obwodu wyjściowego zasilacza pojemność *C4*, 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 ściekowego. 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-onu, toluenu, pentanu, 2-metylobutanalu oraz benzenu. W przypadku pierwszych sześciu związków ich stężenia uległy widocznemu zmniejszeniu jednak odnotowano również znaczący 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, zaś parametry pracy wykonanego urządzenia są zbliżone do zakładanych. W mojej opinii postawiona teza została potwierdzona.

Uwagi redakcyjne:

* Kompozycja pracy jest przejrzysta, lecz korzystne byłoby zamieszczenie streszczeń 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 podsumowująca, 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 pasożytniczych pojemności związanych
z transformatorem wysokiego napięcia na pracę zasilacza?
3. Czy podczas pracy proponowanego przekształtnika mierzono temperatury jonizowanego gazu np. na wylocie któregoś z reaktorów?
4. **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 Kołka, 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, zaś prototyp jego zasilacza był wykorzystany w pilotażowym systemie dezodoryzacji dla instalacji kompostowania osadu ściekowego w przedsiębiorstwie Goleniowskie Wodociągi
i Kanalizacja- co świadczy o znaczących walorach aplikacyjnych tej pracy.

1. **Wnioski końcowe**

Przedstawiona rozprawa doktorska Kandydata pt. „Rezonansowy, półprzewodnikowy generator impulsów wysokiego napięcia do wytwarzania plazmy nietermicznej” przygotowana pod opieką 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 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 mając 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.** Wnioskuję o **przyjęcie niniejszej pracy jako rozprawy doktorskiej** i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Jacka Kołka do publicznej dyskusji nad przedłożoną pracą.