

Łódź, dn. 8.10.2023

dr hab. inż. Grzegorz Raniszewski
Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka
ul. Stefanowskiego 22
90-537 Łódź

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Aftyka pt.: Analiza porównawcza zasilacza wieloelektrodowych reaktorów nietermicznej plazmy generowanej ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

Niniejszą recenzję opracowano na wniosek Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Lubelskiej, która w dniu 12.07.2023 roku powołała mnie na recenzenta. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Grzegorz Karol Komarzyniec, prof. uczelni

1. Ocena aktualności tematu, celu i zakresu rozprawy

Urządzenia, które wykorzystują wyładowania elektryczne do wytwarzania plazmy, działają na zbliżonej zasadzie. Energia elektryczna wyładowania jest wykorzystywana do wytworzenia wysokoenergetycznych elektronów. Reaktory plazmy łączy wiele cech wspólnych. W przypadku plazmy nietermicznej są to zazwyczaj urządzenia o dużej mocy, o wysokim napięciu rzędu kilowoltów. W przypadku plazmy łuku elektrycznego wykorzystywanego do cięcia, spawania, pieców łukowych zasilanie może być ograniczone nawet do kilkunastu woltów, ale prądy będą miały wartości przekraczające nawet 100 amperów. W swojej pracy Doktorant zajął się plazmą nietermiczną generowaną łukiem ślizgającym się. Układy zasilania reaktorów plazmowych stanowią część systemu generacji plazmy. Ponieważ generatory plazmy są bardzo nietypowymi odbiornikami energii elektrycznej to układy zasilania wymagają specjalnych metod projektowania i konstrukcji. Pracę reaktorów plazmy nietermicznej mogą zapewnić tylko specjalne układy zasilania elektrycznego charakteryzujące się takimi właściwościami, aby zapewnić zarówno optymalną pracę reaktorów jak i dobrze współpracować z siecią zasilającą. Powinny nie obniżać jakości energii elektrycznej dla innych odbiorników przyłączonych do sieci, nie powinny odkształcać napięcia i nie wprowadzać jego wahań i asymetrii. Reaktory plazmowe mają charakterystyki mocno nieliniowe, dlatego trudno jest pogodzić ich pracę z poprawną współpracą sieci zasilającej. Wymagają zastosowania często bardzo złożonych układów, a co za tym idzie bardziej zawodnych i mniej sprawnych. Dlatego Doktorant w pracy poddał badaniom analitycznym współpracę reaktora plazmowego z czterema typami zasilacza. Doktorant podjął próbę analizy charakterystyk statycznych i dynamicznych reaktora oraz analizy jakości i ilości zużycia energii, oceny wpływu konstrukcji zasilaczy oraz ich parametrów znamionowych na zdolność generowania plazmy o określonych parametrach tak, aby współpraca zasilacza z reaktorem była jak najkorzystniejsza. W pracy zostały porównane

układy zasilania dedykowane do zasilania wieloelektrodowych reaktorów plazmy nietermicznej. Parametry, które zostały wzięte pod uwagę to:

- wartości napięcia i prądu zasilaczy, częstotliwość napięcia zasilaczy, sprawność i możliwość regulacji mocy,
- gaz plazmotwórczy i jego wpływ na pracę zasilaczy, wzięto tu pod uwagę najczęściej stosowane gazy w technice, tj. hel, argon, powietrze i azot,
- efektywność generacji plazmy,
- jakość energii pobieranej z sieci przez zasilacze,
- przebiegi chwilowe napięcia, prądu i mocy pozornej.

Autor uważa, że wyniki przeprowadzonych doświadczeń znajdą zastosowanie w dalszych pracach nad układami zasilającymi. Po przeprowadzonych badaniach Autor zaproponował autorski projekt współpracy przekształtnika AC/DC/AC z transformatorem pięciokolumnowym.

Uwzględniając powyższe, uważam, że tematyka poruszana w pracy jest aktualna i ważna ze względu na jej znaczenie poznawcze i praktyczne.

Uważam, że cele pracy są ambitne i spełniające wymagania stawiane pracom doktorskim.

Autor przedstawił główną tezę, która została sformułowana następująco:

„Możliwe jest wykorzystanie analizy porównawczej do budowy zasilaczy, tak aby współpraca układu zasilania z reaktorem plazmowym była możliwie jak najkorzystniejsza”

Uważam, że teza pracy jest poprawna i odpowiednio sformułowana.

2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 102 strony. Zawiera dziewięć rozdziałów oraz spis literatury zawierający 50 pozycji, wśród których znajdują się zarówno publikacje krajowe, jak i liczne publikacje międzynarodowe. Uważam, że literatura zacytowana w rozprawie doktorskiej została dobrana w sposób poprawny.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do podjętej tematyki przedstawia cel i zakres pracy. Jest przedstawiona teza pracy i skrót pracy.

Rozdział 2 otwiera część teoretyczną i opisuje stan wiedzy na temat technik generacji plazmy łukowej. Łuk swobodny jest niestabilny, co ogranicza jego zastosowania w technologii. Długość łuku swobodnego, jego położenie w przestrzeni, objętość i parametry fizykochemiczne zmieniają się sposób losowy. Dlatego utrudniona jest jego kontrola w procesach, w których jest ona wymagana. Mimo tego znalazł on zastosowanie w spawaniu, procesach metalurgicznych, utylizacji odpadów, syntezie nanomateriałów. Kontrola jest łatwa w przypadku stabilizacji ścianami reaktora. W rozdziale tym przedstawiono reaktory z pojedynczą barierą dielektryczną, z dwoma barierami dielektrycznymi i z barierą w przestrzeni międzyelektrodowej. do przetwarzania metanu oraz do ozonowania wody.

Opisano tutaj także reaktory z wyładowaniem komplanarnym do oczyszczania powierzchni, płynów i reaktorów z upakowanym dielektrykiem do rozpadu substancji lotnych powstałych w procesach spalania takich jak benzen, tlenki siarki i tlenki azotu. Kolejnym opisywanym reaktorem jest reaktor plazmy mikrofalowej do przyspieszania reakcji chemicznych. Następną grupą reaktorów są plazmotrony osiowe prądu stałego pozwalające osiągać wysokie wartości temperatury plazmy. Na koniec rozdziału zaprezentowane zostały reaktory ze ślizgającym się łukiem typu GlidArc, a także sześcielektrodowy reaktor z łukiem ślizgającym się.

W rozdziale 3 omówione zostały układy zasilania w energię elektryczną reaktorów plazmowych. Opisane zostały zarówno układy prądu stałego jak i przemiennego. Autor skoncentrował się wyłącznie na obwodach magnetycznych oraz na zasilaczach z rozbudowanymi obwodami elektronicznymi. Przedstawiony został trójfazowy zasilacz transformatorowy, który pozwala zainicjować zapłon łuku, a następnie ograniczyć prąd w obwodzie. Układ zasilacza z mostkiem tyrystorowym po stronie wtórnej transformatora pośredniczącego znalazł zastosowanie w przemyśle elektrochemicznym do zasilania pieców łukowych i plazmowo-łukowych. Autor wskazuje, że sterowanie procesem plazmowym może odbywać się także po stronie pierwotnej transformatora dopasowującego. Opisany został także układ zasilacza o podwyższonej częstotliwości, który poprawia charakterystyki regulacyjne układów zasilania reaktorów plazmowych. Na koniec wspomniano o dwóch zasilaczach – zasilacz rezonansowy, który umożliwia galwaniczne oddzielenie odbiornika od źródła zasilania oraz układ zasilacza o szerokim zakresie mocy oraz częstotliwości napięcia z energoelektroniczną przetwornicą przeciwobną AC/DC/AC w technologii push-pull. Autor uzasadnia dlaczego skupił się na układach zasilania reaktorów plazmowych ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym wskazując na fakt, że prowadzone dotychczas badania nad układami zasilania reaktorów plazmowych doprowadziły tylko do uogólnień, ale nie ma teoretycznych podstaw projektowania źródeł zasilania.

W rozdziale 4 opisany został obiekt badań, czyli trójelektrodowy reaktor plazmowy ze ślizgającym się układami zasilania. Zastosowanie trzech elektrod wynika z tego, że sieć trójfazowa w sposób naturalny wymusza stosowanie układu trójelektrodowego.

Rozdział 5 omawia układy zasilania wraz ze specyfikacją techniczną. Analizowane są cztery układy – układ zasilacza reaktora plazmowego o symbolu ZT-14, układ zasilacza o symbolu ZZ-10, układ zasilacza o symbolu ZF-10, układ zasilacza o symbolu ZP-11. Zasilacze ZT-14 wymaga osobnego elektronicznego układu zasilającego elektrody zapłonowe reaktora plazmowego. W zasilaczu ZZ-10 o transformatorowym układzie zasilania w uzwojeniu wtórnym indukuje się napięcie potrojonej częstotliwości. W zasilaczu ZP-11 uzwojenia fazowe transformatora przeznaczone są do zasilania elektrod roboczych reaktora plazmowego. Uzwojenia po stronie pierwotnej i wtórnej połączone są w układ gwiazdy. Ostatnią analizowaną konstrukcją jest zasilacz ZF-10, który składa się z przekształtnika

AC/DC/AC. Zasilacz umożliwia zasilanie jednego lub dwóch trójelektrodowych reaktorów plazmowych lub jeden reaktor sześcielektrodowy.

Za najważniejsze uważam rozdziały 6, 7, 8 i 9.

Rozdział 6 omawia część doświadczalną, w której zaprezentowano stanowisko do badania trójelektrodowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym z dedykowanymi mu układami zasilania w energię elektryczną. Doktorant opisał tutaj także metodykę przeprowadzonych badań, które szczegółowo zostały omówione w rozdziale 7.

W rozdziale 7 przedstawiono wyniki badań stanu pracy stanu jałowego i stanu zwarcia pomiarowego, jak również stanu obciążenia reaktora plazmowego. Badania prowadzono dla helu, azotu, powietrza i argonu. Zauważono, że od rodzaju gazu plazmotwórczego wprowadzonego do komory wyładowczej reaktora zależą jego charakterystyki pracy. Badania prowadzono dla objętościowego przepływu gazu przez dyszę napływu gazów plazmotwórczych do komory reaktora nastawianego w zakresie od 1,6 do 2,8 m³/h. Dokonano analizy oddziaływania na sieć zasilającą tak aby współpraca sieci zasilającej z układem zasilającym oraz reaktorem była jak najkorzystniejsza. Rozdział 7 kończą wnioski z badań będące wytycznymi do projektowania układów zasilania. Autor wskazuje na fakt, że kluczowymi parametrami ze względu na współpracę z siecią zasilającą są: współczynnik mocy, współczynniki odkształceń prądów i napięć oraz sprawność. Znając najkorzystniejsze parametry plazmy dla prowadzonych z jej udziałem procesów, które Doktorant określił w swoich badaniach, można scharakteryzować zasilacze pod względem efektywności ich współpracy z reaktorem plazmowym oraz siecią zasilającą. Z przedstawionych badań można wywnioskować, że mały przepływ gazu, wysokie napięcie łuku oraz niskie napięcie zasilania powodują wzrost zawartości wyższych harmonicznych zarówno dla prądu, jak i napięcia we wszystkich badanych zasilaczach. A niestabilna charakterystyka napięciowo-prądowa wyładowania elektrycznego w reaktorze plazmowym powoduje negatywne jego oddziaływanie na sieć zasilającą i pogarsza jakość energii w efekcie wahań napięcia, asymetrii obciążenia oraz generowania harmonicznych i interharmonicznych zarówno prądu jak i napięcia. Na podstawie przeprowadzonych badań jak i powyższych obserwacji Doktorant wyciągnął wniosek, że najlepszą pracę reaktora można uzyskać scalając najlepsze cechy wszystkich badanych zasilaczy i zaproponował własne rozwiązanie, w którym połączył przekształtnik AC/DC/AC z konstrukcją transformatora pięciokolumnowego.

Rozdział 8 poświęcony jest badaniom własnego układu zasilającego. Doktorant zauważył, że wszystkie zasilacze mają zarówno wady jak i zalety, ale zasilacze ZF-10 oraz ZP-11 mają najwięcej cech predysponujących do zasilania trójelektrodowego reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem. ZF-10 umożliwia regulację prądu i napięcia w szerokim zakresie częstotliwości, ale istnieje konieczność stosowania dodatkowego układu zapłonowego. Zasilacz ZP-11 pobiera energię o najbardziej zrównoważonych parametrach, ale ma ograniczoną możliwość regulacji parametrów zasilania wyładowania, zwłaszcza w azocie i powietrzu. Aby ograniczyć wady Doktorant podjął próbę zintegrowania obydwu zasilaczy.

Zaproponowany układ umożliwia stosunkowo łatwą kontrolę parametrów wyładowania. Zapłonowi wyładowania towarzyszy wysoki impuls co ułatwia jego zapłon. Gwarantuje to niezakłóconą jego pracę. Ponadto badany zasilacz posiada spośród przebadanych zasilaczy największą zmienność natężenia prądu pod wpływem zmiany przebiegu argonu, który jest najczęściej stosowany w instalacjach plazmowych. Uzyskana wartość pobieranego prądu jest najniższa spośród badanych zasilaczy. Zaproponowany zasilacz jest też najkorzystniejszy pod względem mocy pobieranej z sieci. Wskazuje także najwyższą sprawność spośród wszystkich badanych zasilaczy dla wszystkich gazów. Doktorant uzyskał także najwyższe wartości współczynnika mocy. Zastosowanie transformatora pięciokolumnowego z uzwojonymi kolumnami skrajnymi wyeliminowało konieczność stosowania elektronicznych układów zapłonowych, które są podatne na awarię.

Rozdział 9 podsumowuje badania i prezentuje wnioski końcowe. Doktorant wysunął wniosek, że w obszarze efektywnej pracy reaktora plazmowego moc wyładowania zależy od wartości napięcia i prądu jakim zasilane są elektrody robocze reaktora jak również parametrów gazów plazmotwórczych. Zmiana częstotliwości napięcia wyjściowego tylko w niewielkim stopniu wpływa na moc wyładowania.

3. Główne osiągnięcia rozprawy

Do największych osiągnięć Doktoranta zaliczam:

- analiza parametrów konstrukcyjnych, parametrów technicznych oraz charakterystyk pracy najbardziej popularnych konstrukcyjnie zasilaczy, biorąc pod uwagę ich przydatność do zasilania reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym,
- analiza reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym jako odbiornika energii elektrycznej względem jego parametrów elektrycznych i charakterystyk pracy,
- wyznaczenie charakterystyk roboczych reaktora plazmowego dla helu, argonu, powietrza, azotu z uwzględnieniem parametrów gazodynamicznych
- budowę stanowiska doświadczalnego,
- opracowanie nowatorskiego rozwiązania połączenia dwóch typów zasilaczy,
- opracowanie wytycznych do projektowania układów zasilania reaktorów plazmowych,
- określenie wpływu parametrów transformatorów wykorzystywanych w zasilaczach na pracę zasilaczy i pracę reaktora plazmowego,
- sprecyzowanie wymagań stawianym zasilaczom tak, by ich współpraca z reaktorem plazmowym i z siecią zasilającą była najkorzystniejsza,
- optymalizacja systemu zasilania reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

Doktorant opanował tematykę rozprawy nie tylko w formie teoretycznej, ale także praktycznej. Posiada umiejętności prowadzenia eksperymentu badawczego wymagającego

wykonywania pomiarów. Potrafił przeprowadzić optymalizację w oparciu o konstrukcję nowatorskiego, autorskiego rozwiązania.

Stwierdzam, że Doktorant dysponuje wymaganym do prowadzenia badań naukowych zasobem wiedzy z zakresu dyscypliny naukowej: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

4. Ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Podział treści rozprawy jest logiczny i uporządkowany. Poziom językowy jest poprawny. Sposób przekazywania treści zadowalający. Wszystkie symbole zostały precyzyjnie objaśnione.

Autor nie ustrzegł się jednak błędów gramatycznych (np. str. 11. słowo „parametry” występuje 8 razy w 7 następujących po sobie zdaniach),
Strona 28 nie zawiera treści.

Przez to, że rysunek na stronie 33 jest odwrócony, oznaczenia są mało czytelne.

Pojawiają się sformułowania nieprecyzyjne i niejasne.

str. 36 akap. 2, linia 5 – „są wysokie” – co to znaczy?

Str. 37 akap. 1 – „dobrej jakości” – co to znaczy „dobra”?

str. 38, akap.1, linia 4 – co znaczy „mogą pogarszać lub polepszać”?

str. 43, akap. 2, linia 3 – „wpływa” – ale jak?

str. 46, tab. 7.6 – brak jednostek dla U_{2RMS} oraz U_{3RMS}

str. 46, linia 3 – „nie są wysokie” – co to znaczy?

str. 50, akap. 2, linia 7 – powinno być „spośród” gdyż jest to przyimek złożony,

str. 70, linia 1 – wartość 69060 VA wydaje się być nieprawidłową,

str.70, linia 5 od dołu – powinno być „plazmotwórczy”,

str. 85, tab. 7.8 – brak jednostek,

str. 93, linia 13 - powinno być „spośród” gdyż jest to przyimek złożony.

Mimo, że zdarza się pewna liczba błędów edytorskich, stylistycznych, gramatycznych, nie wpływają one w żadnym stopniu na ocenę redakcji rozprawy.

5. Uwagi merytoryczne

1. Stwierdzono, że argon jako gaz plazmotwórczy ma bardzo dobre właściwości dla zapłonu wyładowania oraz jego podtrzymania. Dlaczego argon ma tak dobre własności?
2. Widoczne są duże różnice na wyniki uzyskane dla różnych gazów. Dlaczego dla jednych gazów jedne układy zasilania są lepsze, a dla innych gorsze? Co znaczy lepsze, a co znaczy gorsze? Wg jakich kryteriów?
3. Wskazano, że azot i powietrze jest mieszaniną gazów, w którym największy udział ma azot, dlatego mają podobne właściwości. O jakie właściwości chodzi? Bo charakterystyki

napięciowo-prądowe dla reaktora plazmowego znacznie się różnią dla wszystkich 4 zasilaczy?

4. We wszystkich wynikach pomiarów widoczne są różnice pomiędzy czterema zasilaczami. Jak wytłumaczyć aż takie różnice i jaki jest mechanizm tych różnic? W jaki sposób układ zasilania na wyładowanie łukowe?
5. Palenie się łuku elektrycznego jest procesem silnie stochastycznym. Czy dane pomiarowe były analizowane pod kątem powtarzalności? Ile pomiarów zostało wykonanych aby uzyskać krzywe?
6. Dlaczego technologia z wykorzystaniem zasilacza przekształtnikowego jest korzystniejsza jeśli generuje tak duże odkształcenia prądu?

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Autor podjął interesującą próbę opracowania nowej konstrukcji układu zasilania reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. Konstruując nowy typ układu zasilania Doktorant wykazał, że możliwe jest wykorzystanie analizy porównawczej do budowy zasilaczy, tak aby współpraca układu zasilania z reaktorem plazmowym była możliwie jak najkorzystniejsza zarówno dla układu plazmowego, jak i sieci energetycznej. Cel został zrealizowany poprzez nowe rozwiązanie – połączenie najlepszych cech obwodów magnetycznych oraz elektroenergetycznych układów półprzewodnikowych. Tym samym potwierdził postawioną tezę :

„Możliwe jest wykorzystanie analizy porównawczej do budowy zasilaczy, tak aby współpraca układu zasilania z reaktorem plazmowym była możliwie jak najkorzystniejsza”

Podsumowując recenzję stwierdzam, że Pan mgr inż. Michał Aftyka, w rozprawie doktorskiej „Analiza porównawcza zasilacza wieloelektrodowych reaktorów nietermicznej plazmy generowanej ślizgającym się wyładowaniem łukowym.” zrealizował cel rozprawy. Zaprezentowane rezultaty stanowią oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Pan mgr inż. Michał Aftyka wykazał się umiejętnością samodzielnej pracy badawczej, znajomością zagadnień związanych z reaktorami związanymi ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, a w szczególności z ich układami zasilania.

Stwierdzam, że opiniowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w stosownej ustawie. Wnioskuje o przyjęcie niniejszej pracy jako rozprawy doktorskiej. Wnoszę o dopuszczenie mgra inż. Michała Aftyki do obrony przedłożonej pracy.

dr hab. inż. Grzegorz Raniszewski