

dr hab. inż. Andrzej Typiak, prof. WAT
Instytut Budowy Maszyn
Wydział Mechaniczny
Wojskowa Akademia Techniczna
00-908 Warszawa

Warszawa 10.05.2019 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej kpt. mar. mgr inż. Adama Polaka pt.: „Optymalizacja podsystemu zasilania katody ogniwa paliwowego PEM w obiektach podwodnych”

Recenzja została wykonana dla Wydziału Mechaniczno – Elektrycznego Akademii Marynarki
Wojennej w Gdyni, na podstawie pisma Dziekana Wydziału
pana. dr. hab. inż. Bogdana Żaka, prof. AMW z dn. 13.03.2019 r.

1. Zagadnienia naukowe i naukowo-techniczne rozpatrywane w pracy, aktualność tematyki rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska jest wynikiem prac naukowo-badawczych, umiejscowionych w dyscyplinie „Budowa i Eksploatacja Maszyn” oraz jest mocno powiązana z nowoczesnymi technikami budowy systemów sterowania. Dotyczy ona ważnego z punktu poznawczego i aplikacyjnego zagadnienia związanego z doskonaleniem budowy bezzałogowych aparatów pływających poprzez określenie możliwości rozwoju ich systemów zasilania.

Na stronach 18 - 19 rozprawy Autor przedstawił cel i zakres pracy. Jest to cel w pełni uzasadniony. System wytwarzania mocy oparty na ogniwie paliwowym typu PEM, nie uwzględniając już samego ogniwa, wymaga łączenia w całość wielu komponentów w celu uzyskania efektywnej pracy w różnych warunkach. Ów system musi być zbudowany w otoczeniu ogniwa paliwowego w celu zasilania go w paliwo i utleniacz, w celu usuwania zużytych substratów i ciepła, które jest generowane w reakcjach zachodzących w ogniwie, a także w celu konwersji wytwarzanej mocy prądu stałego w regulowany prąd stały lub prąd przemienny w zależności od rodzaju odbiornika. W celu utrzymania dużej sprawności i uniknięcia spadku napięcia generowanego przez ogniwo, system sterowania musi utrzymywać właściwą temperaturę pracy, wilgotność membrany i ciśnienie gazów reakcyjnych po obu stronach membrany. Projektowanie i optymalizacja pomocniczych urządzeń systemu ogniwa paliwowego jest ważnym zadaniem badawczym. Nadmiar tlenu po stronie katodowej ogniwa może powodować straty mocy, doprowadzając do zmniejszenia mocy netto systemu. Z drugiej strony ogniwa paliwowe zasilane zbyt małym strumieniem tlenu reagują pogorszeniem pracy systemu. Uwzględniając nieliniowe i zmienne w czasie charakterystyki ogniw paliwowych

PEM, ważkim problemem badawczym jest rozwiązanie problemu utrzymania współczynnika nadmiaru tlenu w odpowiednim zakresie, szczególnie w stanach dynamicznych.

2. Struktura rozprawy doktorskiej

Praca doktorska napisana jest w języku polskim. Treść pracy jest zgodna z jej tytułem. Rozprawa składa się z pięciu numerowanych rozdziałów, bibliografii oraz ośmiu załączników. Pracę otwierają użyteczne spisy ilustracji, tabel i ważniejszych oznaczeń, ułatwiające czytanie rozprawy. Struktura rozprawy jest przemyślana i logicznie uporządkowana. Podział treści rozprawy na następujące po sobie spójne rozdziały odpowiada naturalnemu tokowi przeprowadzonych badań. Każdy rozdział rozprawy poprzedzony jest krótkim, rzeczowym wprowadzeniem do jego zawartości.

Pierwszy rozdział zawiera obszernie wprowadzenie do zagadnienia rozpatrywanego w rozprawie łącznie z uzasadnieniem podejmowanego problemu. Zawarto w nim opis podstaw funkcjonowania ogniw paliwowych oraz scharakteryzowano ogniwa paliwowe typu PEM będące obiektem badań zrealizowanych przez doktoranta. W kolejnej części tego rozdziału została przedstawiona analiza dotycząca zagadnienia dostarczania utleniacza do ogniw paliwowych, w szczególności w zastosowaniach podwodnych, od którego zależy prawidłowa i bezpieczna eksploatacja systemu ogniwa paliwowego. Na podstawie tej analizy sformułowano problem badawczy, który zasadniczo dotyczy metody bądź sposobu dostarczania tlenu do stosu ogniwa paliwowego w taki sposób, aby obniżyć zapotrzebowanie na energię elektryczną przez podsystem zasilania utleniaczem. Do problemu badawczego sformułowano pytania dodatkowe uszczegółowujące problem badawczy.

Następnie, do tak zdefiniowanego problemu badawczego, doktorant sformułował tezę rozprawy, w której stwierdził, że obniżenie zapotrzebowania na energię elektryczną przez podsystem utleniacza jest możliwe w wyniku usunięcia z niego pompy recyrkulacji tlenu, przy jednoczesnym utrzymaniu poprawnych warunków pracy stosu przez odpowiednie sterowanie przepływem gazu przez przedział katody stosu ogniwa paliwowego.

Cel pracy nie budzi wątpliwości i warty jest rozprawy doktorskiej, jest jasno zdefiniowany, a problem jest aktualny i ważny z punktu widzenia potencjalnych aplikacji opracowanej metody. Teza zawiera elementy nowości, choć jej formuła jest dość rozbudowana.

System zasilania powietrzem, oparty na zespole silnik elektryczny/sprężarka, wnosi duże obciążenie do sprawności całego systemu ogniw paliwowych. Obecnie stosowane zespoły tego typu zużywają aż do 25% energii wytwarzanej na wyjściu z systemu ogniw paliwowych. Taki układ stanowi aż do 80% zużycia energii przez wszystkie układy dodatkowe. A zatem, optymalizacja zużycia paliwa w takim systemie ogniw paliwowych wymaga przebadania i zamodelowania podsystemu zasilania powietrzem.

W drugim rozdziale rozprawy przedstawiono teoretyczne podstawy funkcjonowania ogniw paliwowych typu PEM, wyprowadzono zależności matematyczne pozwalające na określenie napięcia ogniwa paliwowego w zależności od warunków jego pracy. Istotnym elementem tego rozdziału jest przeprowadzona przez autora analiza logiczna poparta wnioskami z eksploatacji systemu ogniwa paliwowego, która doprowadziła go do wniosku, iż w stosie ogniwa paliwowego występują różnice między wartościami napięć na różnych celach

stosu, określone mianem zróżnicowania napięć w stosie. Co więcej autor wskazuje również, iż zróżnicowanie napięć w stosie ogniwa paliwowego jest zależne od warunków panujących wewnątrz stosu i może być użyteczne na potrzebę sterowania przepływem utleniacza. Jako miarę zróżnicowania napięć w stosie został przyjęty rozstęp napięć. W dalszej części tego rozdziału zawarto wyniki badań eksperymentalny na podstawie których został opracowany model empiryczny zmiany wartości rozstępu napięć w stosie w zależności od współczynnika przepływu tlenu zasilającego katodę stosu ogniwa paliwowego. Opracowany model został wykorzystany do przeprowadzenia badań symulacyjnych zaproponowanej metody sterowania przepływem tlenu opisanych w czwartym rozdziale pracy.

Rozdział trzeci rozprawy dotyczy zagadnienia sterowania przepływem tlenu przez katodę stosu ogniwa paliwowego PEM będącego źródłem zasilania elektrycznego obiektu podwodnego, z podsystemem utleniacza pozbawionego układ recyrkulacji tlenu. Wykazano podobieństwa i różnice między typowymi rozwiązaniami zasilania tlenem, a tym proponowanym przez autora. Następnie zdefiniowano zadanie sterowania i na jego podstawie zaproponowano algorytm sterowania przepływem tlenu. W dalszej części opisano wybrane przez autora metody wyznaczania współczynnika przepływu tlenu, które wykorzystują algorytmy klasycznej i rozmytej regulacji PD oraz regulacji dwupołożeniowej z histerezą do dyskretnego wyznaczania współczynnika przepływu tlenu. W ostatniej części tego rozdziału autor przedstawia przyjęte kryteria oceny zaproponowanej metody sterowania.

W rozdziale czwartym opisano przeprowadzone przez doktoranta badania symulacyjne i eksperymentalne zaproponowanej metody sterowania. W części dotyczącej badań modelowych opisano aplikację komputerową, która posłużyła do przeprowadzenia tych badań. Opisano metodę wyznaczania parametrów poszczególnych procedur sterowania wykorzystującą algorytmy genetyczne. W dalszej części tego rozdziału autor przedstawił wyniki badań symulacyjnych. Następnie scharakteryzowano obiekt, na którym zostały przeprowadzone badania eksperymentalne i przedstawiono ich wyniki w postaci graficznej. Rozdział kończy syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

Rozdział piąty stanowi podsumowanie rozprawy, w którym autor odnosi się do rozpatrywanego w pracy problemu badawczego oraz postawionej tezy. Ponadto skrótowo scharakteryzował poszczególne etapy przeprowadzonego postępowania badawczego. W podsumowaniu stwierdzono, że uzyskane wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie potwierdzają postawioną tezę. Rozdział ten kończy wskazanie dalszych kierunków badań zamierzonych przez doktoranta, mających na celu poszerzenie zakresu badań przedstawionych w rozprawie.

W załącznikach doktorant zamieścił dodatkowe materiały pomocne w zrozumieniu poruszanych w rozprawie zagadnień. Ponadto umieszczono tam również część wyników badań eksperymentalnych użytych do wyznaczenia parametrów modelu rozstępu napięć w stosie. Zdaniem recenzenta załączniki nr 1 i 2 powinny być zamieszczone w treści rozprawy. Przykładowo rysunki 75 – 78 są bardziej czytelne niż rysunek 19. Natomiast załącznik 4 jest uszczegółowieniem opisu ogniw paliwowych PEM, a załącznik 6 zawiera analizę literatury problematyki stosowania w urządzeniach podwodnych ogniw paliwowych.

Rozprawa w swej zasadniczej części zawiera 64 rysunki obrazujące zagadnienia omawiane w rozprawie oraz prezentujące wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Ponadto zamieszczono 21 tabel zawierających głównie zestawienia różnych parametrów lub danych. Dodatkowo w załączniku umieszczono kolejne 27 rysunków przedstawiających głównie wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych oraz dwie tabele.

3. Metoda badawcza i oryginalny dorobek Autora

Zasadniczym osiągnięciem autora opisanym w rozprawie jest opracowanie metody sterowania przepływem utleniacza przez przedział katody stosu ogniwa paliwowego PEM. Osiągnięcie to jest szczególne ze względu na kilka aspektów, które autor musiał rozważyć. Po pierwsze, istotny jest fakt, że przedmiotowe sterowanie dotyczy systemu ogniwa paliwowego będącego źródłem zasilania elektrycznego w obiekcie, w którym brak jest dostępu powietrza atmosferycznego, w szczególności obiektu podwodnego, co jednoznacznie wiąże się z koniecznością wykorzystania czystego tlenu jako utleniacza. Po drugie, sterowanie to musi uwzględniać konieczność zapewnienia realizacji głównych zadań podsystemu tlenowego, tj.: dostarczanie tlenu do powierzchni aktywnych ogniw oraz usuwanie z nich wody powstałej w wyniku zachodzącej reakcji elektrochemicznej. Po trzecie, zadanie to zostało dodatkowo utrudnione przez założoną przez autora modyfikację podsystemu tlenowego polegającą na usunięciu z niego układu recyrkulacji tlenu, który w większości tego typu aplikacji realizuje ww. zadania. Ostatnim istotnym aspektem uwzględnionym w pracy jest stopień utylizacji tlenu, który ze względu na ograniczone jego zasoby w platformach podwodnych powinien być jak najwyższy.

Przeprowadzone przez doktoranta analiza techniczna funkcjonowania systemu ogniwa paliwowego oraz badania eksperymentalne na obiekcie rzeczywistym pokazały iż intensywność przepływu tlenu przez stos ma istotny wpływ na zróżnicowanie napięć na poszczególnych celach stosu. Na podstawie tych badań autor dysertacji opracował model matematyczny dynamiki zmian rozstępu napięć w stosie w funkcji współczynnika przepływu tlenu. Rozstęp napięć, będący miarą zróżnicowania napięć w stosie, przyjęty został jako parametr mówiący o warunkach panujących wewnątrz stosu ogniwa paliwowego. Powyższe pozwoliło na opracowanie innowacyjnej metody sterowania przepływem utleniacza przez przedział katody polegającej na zmianach współczynnika przepływu tlenu, będącego de facto krotnością przepływu stechiometrycznego, w zależności od zmian wartości rozstępu napięć w stosie. Metoda ta została zaimplementowana w dwóch wersjach, a mianowicie z algorytmem dwupołożeniowym z histerezą oraz z algorytmem PD w wykonaniu klasycznym i rozmytym. Opracowana metoda sterowania została zweryfikowana na rzeczywistym systemie ogniwa paliwowego będącego na wyposażeniu Akademii Marynarki Wojennej. Uzyskane w eksperymencie czynniki potwierdziły poprawność opracowanej metody sterowania oraz wypełnianie wszystkich zadań podsystemu tlenowego przy względnie wysokim stopniu utylizacji tlenu.

Doświadczenia związane z rozwojem ogniw paliwowych podpowiadają, że badania modelowe mogą okazać się niezwykle ważnym etapem nie tylko do zrozumienia zachowania

się układu, ale także projektowania bazującej na modelu metodologii sterowania przepływem powietrza. Przegląd literatury wyraźnie wskazuje, że matematyczny model ogniwa paliwowego występuje jako istotny element procesu projektowania sterownika. W powyższych rozważaniach rozwinięty został model głównych elementów ogniwa paliwowego i zostały zaprezentowane problemy związane ze sterowaniem strumieniem powietrza zasilającym stos ogniw paliwowych. Badania symulacyjne i eksperymentalne wykazały, że dla poszczególnych obciążeń prądowych stosu ogniw istnieje optymalna wartość współczynnika nadmiaru tlenu k_{O_2} , której odpowiada maksimum mocy netto. Ze względu na dużą niepowtarzalność pracy ogniw paliwowych wartość optymalna współczynnika nadmiaru tlenu λ może się jednak zmieniać w czasie. Jeżeli do systemu sterowania wprowadzi się wskaźnik jakości oparty na maksymalizacji mocy netto produkowanej przez ogniwo a następnie dzięki zastosowaniu algorytmów adaptacyjnych utrzyma się pracę ogniwa w punkcie optymalnym, można zmniejszyć uchyb statyczny i dynamiczny procesu sterowania oraz zwiększyć sprawność ogólną całego systemu. Tak rozwinięty model może służyć jako narzędzie do testowania algorytmów sterujących rzeczywistym ogniwem paliwowym. Pozwoli to zarówno zmniejszyć czas potrzebny na ich kalibrację, jak i zmniejszyć koszty związane z pracą rzeczywistego stanowiska badawczego. Model stanowi także przydatne narzędzie dydaktyczne, gdyż możliwe są zmiany ustawień pracy systemu, łatwe dodawanie i wyłączanie poszczególnych modułów oraz śledzenie on-line parametrów pracy systemu ogniw paliwowych. Wszystko to ma ułatwić zrozumienie fenomenu zjawisk fizycznych, zachodzących podczas pracy takiego systemu.

4. Słabe strony rozprawy i jej główne mankamenty

Rozprawa spełnia wszystkie kryteria formalne, stawiane pracom doktorskim, jednak zawiera także słabsze strony. Autor w kilku miejscach nie uniknął niedopowiedzeń, powiązanych z niestabilizowaną jeszcze terminologią oraz drobnymi zawłościami stylistycznymi.

Uwagi redakcyjne:

1. W literaturze naukowej stosuje się numerację rysunków „Rys. x.y” – gdzie x – numer rozdziału, y – numer rysunku w danym rozdziale.
2. Odnosząc się w treści rozprawy do rysunku piszemy „na rysunku 1” a nie „na Rys. 1”. W treści zdania nie piszemy z dużej litery (chyba, że nazwy własne).
3. Jeżeli na rysunku są przykładowo dwa wykresy to powinny mieć oznaczenie a) i b) a nie w podpisie rysunek lewy i prawy.
4. Jednostka ciśnienia w układzie SI jest Pa, natomiast w pracy Autor podaje bar.
5. Str. 16. Podpis pod rysunkiem na następnej stronie.
6. Str. 18. „Wykazano, że ze względu na różnorodność warunków panujących w poszczególnych celach stosu ich napięcia nie są równe i *cechują się pewnym zróżnicowaniem.*”
7. Str. 24. „Jednakże *natura* rzeczywistych procesów termodynamicznych oraz przewodnictwa elektrycznego *przyczynia się do powstawania strat energetycznych* w ogniwach paliwowych.”
8. Wzór (33) – nie określono V_{cj} .

9. Str. 61. Tabela 5 na dwóch stronach.

Uwagi do treści merytorycznych rozprawy:

1. Na rysunku 20 przedstawiono przebieg zmian rozstępu napięć w stosie dla skokowej zmiany współczynnika stechiometrycznego z wartości 1,0 na 1,2 dla badań symulacyjnych i dane z pomiarów. Ogólny charakter obu jest bardzo zbliżony, jednak otrzymany w badaniach symulacyjnych rozstęp napięć w stosie ma przebieg hiperboliczny, podczas gdy zarejestrowane wyniki doświadczalne wskazują, że w pewnych okresach czasu rozstęp napięć ma wartość stałą. Czy Autor analizował przyczynę tego zjawiska?
2. Na stronie 47 Autor podaje, że „Eliminacja układu recyrkulacji tlenu sprawia ponadto, że odchodzi kryterium związane z maksymalizacją efektywności systemu ogniwa paliwowego, definiowanej jako stosunek mocy dostarczonej do urządzeń a mocy faktycznie oddanej przez stos ogniwa paliwowego.”. Czy Autor może to uzasadnić w sposób bardziej pogłębiony niż to przedstawiono w rozprawie?
3. Przedstawiając w pkt. 4.1.2.2. Badanie rozmytego sterowania PD przepływem tlenu Doktorant zdefiniował funkcje przynależności zmiennych lingwistycznych i bazę reguł, nie podał natomiast jaką zastosował regułę wnioskowania i defuzyfikacji. Pewien niedosyt też budzi brak analizy wpływu zmian funkcji przynależności zmiennych wejściowych na przebieg rozstępu napięć i współczynnika przepływu tlenu.
4. Analizując wyniki badań doświadczalnych zaproponowanych procedur wyznaczania współczynnika przepływu tlenu k_{O_2} i R_U oraz porównania ich ze sobą, Doktorant wyznaczył wartości średnie tych wielkości. Czy nie należało dokonać głębszej analizy otrzymanych przebiegów stosując inne wskaźniki oceny?

Znajdujące się w pracy drobne wady redakcyjne w pracy są mało istotne, szczególnie na tle przedstawianych w rozprawie interesujących i nowatorskich, możliwych do skomercjalizowania, wyników badań naukowo-technicznych.

7. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Mimo przedstawionych powyżej uwag krytycznych (które nie podważają zasadniczego dorobku doktoranta) uważam, że przyjęta hipoteza rozprawy została pozytywnie zweryfikowana, a wyznaczone cele pracy mają charakter naukowy i zostały konsekwentnie zrealizowane.

Rozprawa doktorska świadczy dobrze o ugruntowanej teoretycznej wiedzy Autora i opanowaniu przez niego warsztatu naukowego, wspomagającego badania eksperymentalne. Opracowany przez Doktoranta model matematyczny dynamiki zmian rozstępu napięć w stosie w funkcji współczynnika przepływu tlenu., potwierdza jego umiejętności w wykorzystywaniu profesjonalnego oprogramowania i nowoczesnych układów sterowania do rozwiązywania trudnych zadań o wyraźnym charakterze innowacyjnym. Przeprowadzone eksperymenty świadczą o trafności przyjętej koncepcji naukowej, wspierając postawioną tezę. Praca doktorska ma charakter zarówno teoretyczny (koncepcja) jak i doświadczalny.

Na uwagę zasługuje podjęcie ambitnego tematu, wyraźnie inspirowanego potrzebami

praktycznymi w obszarach automatyki i robotyki oraz informatyki.

8. Podsumowanie

Opiniowana rozprawa doktorska oraz dorobek naukowy kpt. mar. mgr inż. Adama Polaka zawiera wiele wartościowych wyników badań. Świadczy to o tym, że Doktorant posiadał duży zakres wiadomości z zakresu analizy i opisu zjawisk zachodzących w stosie ogniwa paliwowego PEM, umie poprawnie postawić zagadnienie naukowe, rozwiązać je, wyniki zanalizować i sformułować poprawne wnioski. Zna On też współczesną literaturę związaną z rozważanymi zagadnieniami naukowymi. Jego wywody są poprawne, a wyniki pracy doktorskiej mogą być pożyteczne dla pracowników naukowych.

