

dr hab. inż. Mariusz R. Rząsa prof. PO  
Politechnika Opolska  
Wydział Mechaniczny  
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole  
Tel.: +48 602 345 162  
e-mail: m.rzasa@po.opole.pl

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Melki

**pt. Coupled thermal electromagnetic numerical modelling of an effective heat dissipation process from an electricmotor.**

### **1. PODSTAWA FORMALNA OPRACOWANIA RECENZJI**

Formalną podstawą przygotowania niniejszej recenzji jest pismo Prodziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej dr hab. inż. Joanny Kalki prof. PŚ. RIE-BD/4/545/2018/2019 z dnia 26.07.2019 r. zlecające wykonanie recenzji w oparciu o uchwałę Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej z dnia 12 lipca 2019 r. oraz dostarczony egzemplarz rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Melki pt. " Coupled thermal electromagnetic numerical modelling of an effective heat dissipation process from an electricmotor ".

Praca doktorska prowadzona była w Instytucie Techniki Ciepłej, a wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach, której promotorem jest Dr hab. inż. Jacek Smółka, prof. w Pol. Śl., a promotorem pomocniczym jest dr inż. Janusz Hetmańczyk.

### **2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY**

Rozprawa doktorska wydana została w formie zwartej opracowania. Obejmuje 127 nie licząc streszczenia w języku polskim i angielskim. Podzielona jest na 5 rozdziałów merytorycznych oraz spis treści, bibliografię. Bibliografia zawiera 109 pozycji literaturowych w tym cztery pozycje współautorskie. Rozprawa doktorska rozpoczyna się od podziękowania.

Pierwszy rozdział składa się z pięciu podrozdziałów. Stanowi on wprowadzenie do tematyki pracy. W pierwszym podrozdziale bardzo ogólnie opisano problematykę typowych silników elektrycznych. Zwrócono uwagę na problem rozprzestrzeniania się ciepła podczas pracy silników elektrycznych, motywując uzasadniając podjętą tematykę. W drugim podrozdziale Autor dokonał krótkiego przeglądu literatury na temat modelowania wymiany ciepła. Proces wymiany ciepła jest znany i dobrze opisany w literaturze. W przypadku silników elektrycznych opisanie procesu rozchodzenia się ciepła dla każdego z elementów oddzielnie nie stanowi większego problemu, jednak analizując silnik jako całość, zagadnienie to jest znacznie trudniejsze. Podczas pracy w silniku elektrycznym występuje jednocześnie przewodzenie ciepła, promieniowanie, konwekcja naturalna i wymuszona. Procesy te są ze sobą powiązane, a złożona geometria elementów silnika dodatkowo utrudnia modelowanie. Uważam, że podjęcie tej tematyki zasługuje na pochwałę i niewątpliwie jest to naukowy aspekt pracy. W podrozdziale trzeci przedstawiono cel pracy. W kolejnym podrozdziale opisano konstrukcję badanego silnika oraz zaproponowano trzy zmiany konstrukcyjne mające poprawić efektywność odprowadzenia ciepła. Rozwiązania te będą tematem badań a wyniki porównano z typową konstrukcją silnika bez zmian konstrukcyjnych. Ostatni podrozdział stanowi streszczenie kolejnych rozdziałów pracy.

W rozdziale drugim opisano planowany przebieg badań eksperymentalnych. Badania podzielono na dwa eksperymenty. Pierwszy miał na celu zbadanie procesu opływu i odbioru ciepła od obudowy silnika. Wyniki eksperymentu umożliwią ocenę wpływu zmian konstrukcyjnych obudowy na skuteczność wymiany ciepła. W drugim eksperymencie skupiono uwagę na procesie rozchodzenia się ciepła wewnątrz obudowy silnika.

Rozdział 3 zawiera opis opracowanych modeli numerycznych. Przedstawiono w nim dwa modele skorelowane ze stanowiskiem badawczym. Modele przygotowano w oparciu o komercyjne oprogramowanie ANSYS. Modele te oparto na równaniach Reynoldsa Naviera – Stokesa uzupełnionych o model turbulencji k-ε. Analizę numeryczną w uzwojeniach i obszarze rdzenia uzupełniono modelem przewodzenia ciepła oraz modelem elektromagnetycznym.

Wprawdzie opływ powietrza wokół silnika raczej będzie laminarny jednak zastosowanie modelu turbulentnego może być stosowany do takich obliczeń. Uważam, że spośród różnych modeli turbulencji oferowanych przez oprogramowanie ANSYS model k-ε jest słuszny, z uwagi na niewielkie zwirowania strugi gazu, a właściwości modelu do uśredniania zawirowań znacznie ułatwią interpretację otrzymanych wyników.

Rozdział 4 poświęcono walidacji modeli numerycznych. omawia wyniki kampanii eksperymentalnych i model numeryczny. Porównano wyniki obliczeń z wynikami eksperymentu. Wyniki przestawiono na wykresach w bardzo czytelny sposób, a porównanie wyników potwierdza zbieżność otrzymanych wyników i słuszność przyjętych założeń w modelach teoretycznych. Na rysunku 4.7 przedstawiono wyniki wizualizacji ruchu powietrza wewnątrz komory badawczej. Jednak czytelność tych rysunków jest bardzo słaba. Z pewnością film z tego procesu wizualizacji będzie czytelniejszy. Mam nadzieję, że zostanie to pokazane podczas publicznej obrony.

Rozdział 5 stanowi podsumowanie i wnioski końcowe. Przedstawiono krótkie podsumowanie rozprawy oraz bardzo obszerne wnioski końcowe. Wnioski dotyczą walidacji metod numerycznych oraz wskazano zalety i wady zastosowanych metod numerycznych. Wskazano również najbardziej skuteczne rozwiązanie rozpraszania ciepła w silniku. Zawarto sugestie dotyczące dalszych prac. W rozdziale tym brakuje jednak zwięzłego opisu. Brak jest podsumowania w kilku punktach najważniejszych wniosków wynikających z pracy. Sugeruję zrobić takie podsumowanie podczas obrony pracy doktorskiej.

Ostatni rozdział stanowi bibliografia składająca się z 109 pozycji. W pozycjach literaturowych autor odwołuje się do zasobów internetowych w postaci linków do stron internetowych. W przypadku tego rodzaju odwołań warto umieszczać informacje z jakiego dnia pochodzą informacje wykorzystane w pracy. Tego rodzaju źródła charakteryzuje to, że są łatwo modyfikowane i niejednokrotnie informacja zamieszczona na stronie internetowej ulega zmianie po pewnym czasie.

### **3. Szczegółowa ocena pracy**

#### **3.1. Uzasadnienie podjętej tematyki**

Odprowadzenie ciepła pochodzące z uzwojenia silnika elektrycznego jest zagadnieniem analizowanym od wielu lat. Ponieważ wciąż pojawiają się nowe konstrukcje silników elektrycznych problem ten nie traci na aktualności. Autor pracy podjął się analizy rozprzestrzeniania ciepła w silniku PM BLDC. Tego rodzaju konstrukcja jest już znana i produkowana seryjnie od jakiegoś czasu, jednak na tle innych rozwiązań można ją uznać za stosunkowo nową konstrukcję. Rosnąca popularność zastosowania tego rodzaju silników np. w klimatyzatorach oraz napędach elektrycznych pojazdów powoduje, że podjęta tematyka pracy jest uzasadniona.

Analiza jak wpływają pewne zmiany konstrukcyjne na efektywność odprowadzenia ciepła

stanowi cenną wiedzę przy konstruowaniu tego rodzaju silników. Opracowana przez autora metoda numerycznej symulacji tego procesu, może nieś zastosowanie przy badaniu innych rozwiązań konstrukcyjnych silników.

Teza pracy jest raczej oczywista, na uwagę natomiast zasługuje analiza wpływu zmian konstrukcyjnych silnika na efektywność oddawania ciepła.

**Biorąc powyższe pod uwagę, uważam wybór tematu rozprawy za uzasadniony.**

### **3.2. Ocena wyników badań**

Badania eksperymentalne przedstawione w pracy dotyczyły pomiaru procesu dystrybucji ciepła zarówno wewnątrz jak i na zewnątrz badanego silnika. Silnik pracował w kontrolowanych warunkach przy zmiennym obciążeniu.

W podrozdziale 2.1 opisano budowę stanowiska do przeprowadzenia pierwszego eksperymentu. Autor słusznie założył osłonięci silnika obudową, aby ograniczyć wpływ warunków zewnętrznych na proces wymiany ciepła. W pracy nie zamieścił jednak wymiarowanego rysunku stanowiska a jedynie zdjęcie. Na tej podstawie nie jest możliwa ocena poprawności przyjętej koncepcji. **Patrząc na proporcje wymiarowe zamieszczone na zdjęciu ma się wrażenie, że obudowa jest zbyt mała. Może to powodować, że powstanie tzw. ciąg kominowy, zjawisko to nie będzie prawidłowo oddawało wymiany ciepła w warunkach rzeczywistych. Wyniki takich badań mogą jedynie posłużyć do celów porównawczych.** Uważam, że umieszczenie generatora w osłonie wspólnie z badanym silnikiem nie jest dobre. Generator będzie również emitował ciepło, a rozdzielanie informacji z czujników temperatura na ciepło pochodzące od silnika i generatora nie będzie sprawą prostą. Uważam, że lepszym rozwiązaniem byłoby umieszczenie generatora poza osłoną.

W rozdziale 2.1.3 przedstawiono analizę strat mocy występującą w poszczególnych elementach silnika. **W analizie nie ujęto strat mocy pneumatycznej, zużytej na przepompowanie powietrza przez wirnik silnika. Jest to o tyle istotne, że tak jak podano w rozdziale 2.2.3 moc w rdzeniu  $P_{FE}$  określono na podstawie bilansu mocy. Nieuwzględnienie mocy pneumatycznej będzie prowadziło do zawyżenia tej wielkości.**

Na wykresach 4.3 do 4.6 i 4.9 do 4.12 dla czujników umieszczonych wewnątrz silnika temperatura zmierzona jest niższa niż temperatura obliczona numerycznie. **Proszę o skomentowanie co jest przyczyną tej tendencji.**

**Pomimo dostrzeżonych usterek/braków oceniam tą część pracy pozytywnie.**

### **3.3. Ocena merytoryczna pracy**

Praca jest logicznie uporządkowana i zawiera część teoretyczną oraz badawczą. Przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych, które stanowiły podstawę walidacji modelu numerycznego. Zaproponowanie modelu numerycznego do opisu zjawisk termicznych zachodzących w silniku oraz jego walidacja z wynikami eksperymentu stanowi wkład naukowy w niniejszej pracy.

W części teoretycznej poświęconej modelowaniu (podrozdziały 3.1 i 3.2) bardzo szczegółowo opisano zastosowane modele oraz sposób wygenerowania siatek do obliczeń numerycznych. Przeprowadzono analizę wpływu rozkładu elementów siatki na jakość wyników obliczeń. Świadczy to o dobrym przygotowaniu teoretycznym doktoranta.

Tą część pracy oceniam wysoko. Doktorant poprawnie dobiera parametry modeli i potrafi weryfikować siatki numeryczne w odniesieniu do zamierzonych efektów obliczeń. **Brakuje jednak w tej części czytelnej informacji jak został zamodelowany generator oraz występujące w nim źródła ciepła. Ponieważ generator jest silnikiem elektrycznym więc można się domyślać, że zamodelowano go identycznie jak silnik, jednak wartałoby o tym napisać w pracy.**

### 3.4. Uwagi do pracy

Przedmiotowa praca doktorska jest napisana poprawnym językiem. Posiada prawidłowy podział treści. W trakcie jej czytania nasunęły mi się jednak następujące uwagi:

1. **Do pomiaru prędkości ruchu powietrza wewnątrz obudowy silnika użyto laserowego dopplerowskiego miernika prędkości. Przyrządy tego typu mierzą punktową prędkość ruchu gazu. W przypadku ruchu powietrza wewnątrz obudowy silnika występują silne turbulencje, powodujące zmienny kierunek wektora prędkości ruch. Skoro tą metodą postanowiono wyznaczyć prędkość w kierunku pionowym i poziomym to jak uśredniono wskazania miernika prędkości.**
2. W pracy zauważono drobne błędy edycyjne związane ze składem tekstu. Przykładowo strona 23, Tabela 2.2 nie powinna być wstawiona w tekst rozdzielając akapit. Raczej tabele umieszcza się po lub przed akapitem.
3. **Rys 4.8 przedstawia linie ruchu powietrze wewnątrz komory badawczej. W Opisach tego rysunku zamieszczono dwie kolorowe skale temperatury i prędkości. Zbieżność kolorów na obu skajach powoduje, że trudno jest na tym rysunku zorientować się która linia do czego się odnosi.**
4. Na wykresach 4.3 do 4.6 i 4.9 do 4.12 nie ma konsekwencji w oznaczeniu czujników temperatury, gdyż w opisie stanowiska stosuje się oznaczenie T1, T2 itp., natomiast na wykresach 1, 2 itp.
5. Rysunek 4.1 brak jest uzasadnionego powodu, dla którego nie przedstawiono rozkładu temperatur wewnątrz generatora.

## 4. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Pomimo pewnych błędów i usterek rozprawa rzetelnie dokumentuje szeroko zakrojone i przeprowadzone badania. Praca dowodzi zrozumienia istoty działania analizowanego układu oraz zachodzących w nim zjawisk, a Doktorant wykazał się umiejętnością interpretacji wyników.

W rozprawie opisano rozwiązanie problemu badawczego, co potwierdza wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętność prowadzenia badań. **Opiniowana praca spełnia zatem wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (D. U. 2003, Nr 65, poz. 595 z późn. zm.). Wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

*Mariusz R. Ręsa*