

Warszawa, 23 sierpnia 2019 r.

dr hab. inż. Maciej Jaworski, prof. PW
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Nowowiejska 21/25; 00-665 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Bartłomieja Melki pt. "Coupled thermal electromagnetic numerical modeling of an effective heat dissipation process from an electric motor",
opracowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej z dnia 26 lipca 2019 roku.

1. Tematyka rozprawy

Procesy cieplne sprzężone w szczególności z procesami elektrycznymi, ale także mechanicznymi, stanowią poważne wyzwanie zarówno dla inżynierów, jak i osób badających te zagadnienia na poziomie podstawowym, koncentrujących się na zjawiskach fizycznych. Dynamiczny rozwój elektroniki w ostatnich dekadach, przejawiający się miniaturyzacją podstawowych elementów elektronicznych, wzrostem szybkości ich pracy, jak również tworzeniem systemów komputerowych złożonych z dziesiątek tysięcy mikroprocesorów (superkomputery, centra przetwarzania danych) wymusił rozwój technologii odprowadzania ciepła generowanego w trakcie pracy tych urządzeń/systemów. Obecne techniki chłodzenia elektroniki uwzględniają wszystkie mechanizmy transportu ciepła, również złożone – w sensie fizycznym – procesy wrzenia, także w przepływach w mikrokanałach. Względy ekologiczne, ale także ekonomiczne, spowodowały w ostatnich latach wzrost zainteresowania napędami elektrycznymi także do zastosowań w motoryzacji, tendencja rozwojowa określana jako *elektromobilność*. Należy oczekiwać dynamicznego rozwoju silników elektrycznych do tych zastosowań, w tym także ich miniaturyzacji i zwiększenia mocy jednostkowych. Podobnie jak w przypadku rozwoju elektroniki spowoduje to pojawienie się istotnych problemów związanych z zapewnieniem odpowiednich warunków termicznych ich pracy, tzn. dobór odpowiednich metod odprowadzania ciepła w celu utrzymania lub ograniczenia ich temperatury.

Praca badawcza mgra inż. Bartłomieja Melki, która w ujęciu inżynierskim dotyczy chłodzenia silników elektrycznych wybranego typu, zaś w wymiarze naukowym sprzężonych zagadnień cieplnych i elektrycznych (elektromagnetycznych), odnosi się od aktualnych problemów zarówno technicznych, jak i naukowych. Szczególnie warty podkreślenia jest fakt, że przeprowadzone przez Doktoranta badania obejmują nie tylko symulacje komputerowe, ale także fizyczne eksperymenty wymagające wykorzystania różnorodnych, także zaawansowanych technik pomiarowych.



2. Charakterystyka rozprawy

Przedstawione do recenzji rozprawa doktorska, opublikowana przez Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, została przygotowana w języku angielskim. Obejmuje łącznie 141 stron, przy czym część merytoryczna – 5 rozdziałów i wykaz pozycji bibliograficznych – mieści się na 127 stronach. Poza tym publikacja zawiera elementy stałe, takie jak wykaz oznaczeń (*Nomenclature*) oraz streszczenia w języku angielskim i polskim. Bibliografia obejmuje 109 pozycji, w większości są to aktualne publikacje naukowe dotyczące badanych zagadnień (także publikacje z 2019 roku), ale są też publikacje z początku XX wieku, co świadczy o tym, że problemy cieplne towarzyszą rozwojowi napędów elektrycznych od samego początku. Na liście referencyjnej są 4 publikacje, których współautorem jest mgr inż. Bartłomiej Melka (w każdej jako pierwszy autor).

W **rozdziale I** (*Introduction*) Autor uzasadnia celowość podjętej pracy badawczej, podkreślając aspekty ekologiczne (nacisk na zwiększenie wykorzystania OZE) i ekonomiczne wymuszające zwiększenie wykorzystania napędów elektrycznych także w motoryzacji. Przedstawił argumenty będące podstawą wyboru konkretnego typu silnika (bezszerokowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi) jako przedmiotu szczegółowych badań. Wskazał na konieczność prowadzenia analiz termicznych na każdym etapie projektowania silników elektrycznych.

Rozdział ten zawiera dość obszerny przegląd literaturowy obejmujący prace poświęcone ogólnym problemom chłodzenia silników elektrycznych, metodom wyznaczania rozkładów temperatury w tych urządzeniach, w tym opartych na symulacji komputerowej procesów cieplno-przepływowych, a także technikom pozwalającym na intensyfikację odprowadzania ciepła z silników prowadząc tym samym do ograniczenia wzrostu temperatury w kluczowych ich elementach. Drobną uwagę do tej części przeglądu – Autor wskazuje na techniki oparte na wykorzystaniu materiałów PCM (*phase change materials*) do stabilizacji temperatury silników w stanach nieustalonych. W kolejnych zdaniach pisze o wykorzystaniu rurek cieplnych (*heat pipes*) do intensyfikacji odprowadzania ciepła, określając, że w nich także stosowane są materiały PCM. W technice cieplnej skrót PCM odnosi się do materiałów ulegających przemianom topnienie-zestalenie, w rurkach cieplnych także zachodzą przemiany fazowe, ale w odniesieniu do czynników roboczych nie używa się określenia PCM.

Na podstawie przeglądu literatury oraz wcześniejszych, ogólnych rozważań, Doktorant sformułował szczegółowy cel pracy badawczej oraz tezę rozprawy doktorskiej, wskazującą na możliwość efektywnego obniżenia temperatury uzwojeń analizowanego silnika elektrycznego przez zastosowanie pasywnych technik odprowadzania do otoczenia generowanego w nim ciepła. Przedstawił metody intensyfikacji odprowadzania ciepła z silnika, które są przedmiotem dalej opisanych badań, tj.: pokrycie zewnętrznych powierzchni warstwą o dużej emisyjności dla promieniowania, zastosowanie zewnętrznego żebrowania oraz wprowadzenie wypełniacza do wolnych przestrzeni stojana poprawiającego transport ciepła wewnątrz silnika.

Rozdział II zawiera opis prowadzonych badań eksperymentalnych. Doktorant przeprowadził dwa niezależne cykle pomiarowe. W pierwszym skupił się na badaniu procesu konwekcji naturalnej w przestrzeni wokół silnika mierząc rozkłady prędkości powietrza i jego temperatury w wielu punktach. Pomiaru te pozwoliły na oszacowania intensywności konwekcyjnego

strumienia ciepła na zewnętrznych powierzchniach silnika. Drugi cykl pomiarowy miał na celu określenie efektywności badanych technik rozpraszania ciepła z silnika i sprowadzał się głównie do pomiarów temperatury w różnych punktach układu – ograniczenie temperatury silnika, przede wszystkim uzwojeń, przyjęto jako miarę efektywności.

Stanowiska badawcze, jak również techniki i procedury pomiarowe opisane są bardzo szczegółowo i w sposób przejrzysty, także dzięki zamieszczonym ilustracjom i schematom. Opis metodyki badawczej, moim zdaniem, wymagałby kilku drobnych uzupełnień: (1) brakuje wymiarów użytych termoelementów, podano tylko ich typ; (2) wyjaśnienia wymaga sposób pomiaru składowych szybkości przepływu powietrza (*the specific component of the velocity is estimated*) przy użyciu techniki CTA (Constant Temperature Anemometry).

Rozdział III stanowi opis metody badawczej opartej na technikach symulacji komputerowej. Doktorant przede wszystkim bazował na technice CFD (Computational Fluid Dynamics), która jest powszechnie wykorzystywana do analizy zjawisk cieplno-przepływowych. W swojej pracy wykorzystał także metody komputerowe analizy zjawisk elektromagnetycznych, pozwalające bardzo dokładnie wyznaczyć strumienie ciepła generowane w różnych elementach badanego silnika. W obu przypadkach Doktorant korzystał z komercyjnych kodów obliczeniowych (ANSYS-Fluent oraz Maxwell software), jednakże z koniecznością opracowania własnych procedur ujmujących specyfikę badanych problemów. Doktorant dokonał także sprzężenia obu pakietów obliczeniowych – każdy z nich jako danych wejściowych wymagał m.in. wyników obliczeń drugiego.

Rozdział ten zawiera bardzo szczegółowy opis działań podjętych przy modelowaniu numerycznym badanych procesów wskazujący na dużą wiedzę Doktoranta w tym zakresie, a także na świadomość ograniczeń związanych z wykorzystaniem komercyjnych kodów obliczeniowych do analizy złożonych procesów fizycznych.

Kilka uwag, które nasunęły się przy lekturze tego rozdziału:

- Uwagę recenzenta wzbudziło zdanie na stronie 34: “Moreover, the winding resistance was confirmed by the technical method of the resistance measurement and by the destructive study of the analysed motor.” Dlaczego stosowano destrukcyjną metodę określania rezystancji?
- Dlaczego przyjęto inne wartości przewodności cieplnej aluminium (z którego wykonano housing of the motor), str. 36 i 45?
- Doktorant w tekście określa, że model elektromagnetyczny tworzą trzy równania Maxwella (str. 57 i 63), chociaż podaje cztery.
- Doktorant przeprowadził bardzo szczegółową (czaso- i pracochłonną) analizę zjawisk elektromagnetycznych, mającą na celu określenie wielkości objętościowych źródeł ciepła występujących w modelu cieplnym. Czy rozważane były inne, uproszczone metody wyznaczenia tych wielkości, nie wymagające modelowania 3D pól elektromagnetycznych?

Rozdział IV (Results) zawiera wyniki badań zarówno eksperymentalnych, jak i numerycznych. Praca miała cel ogólny, jakim była analiza termiczna pracy wybranego silnika elektrycznego, w tym zbadanie możliwości redukcji temperatury jego kluczowych elementów przez zastosowanie technik pasywnych odprowadzania ciepła. Celem szczegółowym było opracowanie modeli obliczeniowych pozwalających na prowadzenie analiz wskazanych w poprzednim zdaniu, w tym zadań optymalizacyjnych, z wykorzystaniem metod symulacji komputerowych, tańszych i łatwiejszych niż metody eksperymentalne. Badania eksperymen-

talne prowadzone w ramach pracy, oprócz informacji bezpośrednio wskazujących na efekty podjętych zabiegów (mających na celu redukcję temperatury silnika) były także podstawą walidacji modeli numerycznych. Uzasadnia to sposób w jaki Doktorant przedstawił wyniki prowadzonych badań – są one zestawione w jednym rozdziale, a wtedy, kiedy istotne jest wskazanie zgodności modeli z eksperymentem – zestawione na wspólnych wykresach.

Wyniki analiz są prezentowane głównie w postaci wykresów, niektóre z nich zawierają dość dużo informacji, ale są czytelnie opisane. Część wyników to dwuwymiarowe pola temperatury wyznaczone przy użyciu kodów obliczeniowych, a także termogramy zarejestrowane w trakcie pomiarów.

Walidacja potwierdza w dużym stopniu zgodność wyników symulacji komputerowych z wynikami pomiarów eksperymentalnych. W niektórych punktach zanotowano znaczne rozbieżności, zostały one jednak w sposób racjonalny wyjaśnione.

Ilościowe wyniki analiz (w odniesieniu do temperatury w kluczowych punktach silnika) wskazały także na efektywność poszczególnych technik rozpraszania ciepła z silnika.

Ostatni, V rozdział pracy zawiera zestawienie wniosków i obserwacji zamieszczonych w szczególności w rozdziale IV (Results), Doktorant wskazuje także na kierunki dalszych prac w tym obszarze.

Przedstawiona wyżej struktura pracy, jak i zawartość kolejnych rozdziałów, nie budzą zastrzeżeń. Materiał w poszczególnych rozdziałach tworzy spójną całość i jest czytelny.

3. Uwagi szczegółowe

Część uwag zamieszczono w poprzednim punkcie recenzji. Dla porządku poniżej wyszczególniono dodatkowe, mniejszej rangi, uwagi głównie dotyczące zauważonych nieprecyzyjnych sformułowań, czy też błędy o charakterze redakcyjnym i edycyjnym.

Uwagi redakcyjne, brak precyzji sformułowań itp.:

- Wykaz oznaczeń jest niekompletny, nie obejmuje np. wielkości występujących w modelu elektromagnetycznym (EMAG).
- Str. 6: sformułowanie "*In heat pipes, the phase change of internal structure occurs*" jest niepoprawne, to nie struktura wewnętrzna rurki cieplnej ulega przemianie fazowej.
- *Aluminium* – w języku angielski *aluminum* (str. 8 i dalej).
- Str. 15: *The set of T-type thermocouples were connected by the National Instruments module to the computer software of the same producer.* Połączenie termoelementów z oprogramowaniem.
- Na str. 23: zamiast *according to the multiplication* powinno być *by multiplication (multiplying)*
- Str. 29: przedostatnie zdanie w akapicie nad rys. 3.3 jest niekompletne.
- Pierwsza linia w punkcie 3.3.3. jest nieprecyzyjna.
- W opisie rys. 3.22 jest drobny błąd – *stator core* jest '*transparent grey*' a *rotor core* po prostu '*grey*' (w tekście jest odwrotnie).
- W pierwszym akapicie punktu 3.5 sformułowanie *to estimate the power losses estimation* jest niezgrabne, całe zdanie wymaga korekty.

- Wartości prędkości obrotowej dla *Operating Point V* są inne w tablicy 2.1 i w podpisach pod rysunkami w punkcie 4.1 (gdzie są zaokrąglane).
- W pierwszej linii punktu 4.2 powinno być *Experimental Campaign II* (a nie I).
- Położenie termoelementów T12 do T24 nie jest pokazane na żadnym schemacie.
- W części dotyczącej modelu procesów elektromagnetycznych powinno się wyraźnie zaznaczyć, że chodzi o przewodność elektryczną (σ na str.57).

Uwaga dotycząca składu (łamania) tekstu: w wielu miejscach na nowej kolumnie (stronie) tekstu pojawiają się niepełne, ostatnie linie, lub wręcz pojedyncze słowa z akapitu z poprzedniej kolumny.

4. Osiągnięcia zawarte w rozprawie

Biorąc pod uwagę zawartość ocenianej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Doktorant podjął się analizy zagadnienia obejmującego elementy o charakterze naukowym, sformułował jednoznacznie tezę a następnie udowodnił ją stosując odpowiednie i aktualne metody badawcze.

Głównym osiągnięciem naukowym jest opracowanie bardzo złożonego modelu obliczeniowego pozwalającego na ocenę ilościową stanów termicznych silnika elektrycznego, w którym zastosowano różne, pasywne techniki odprowadzania ciepła do otoczenia. Złożoność tego modelu wynika nie tylko ze skomplikowanej geometrii silnika, ale także z uwzględnionych procesów transportu ciepła, przepływów powietrza, ale również anizotropii przewodności cieplnej uzwojeń i sposobu określania wewnętrznych źródeł ciepła. Doktorant dokonał walidacji eksperymentalnej modelu, uzyskując dużą zgodność wyników symulacji komputerowych z wynikami pomiarów. Może on być traktowany jako użyteczne narzędzie przy projektowaniu silników elektrycznych w kontekście ich stanów termicznych.

W mojej ocenie na szczególne podkreślenie zasługują także dwa następujące elementy pracy doktorskiej:

- przeprowadzenie szeroko zakrojonych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem różnorodnych technik pomiarowych,
- opracowanie modelu zjawisk elektromagnetycznych i sprzęgnięcie tego modułu obliczeniowego z pakietem obliczeń cieplno-przepływowych, CFD.

Bardzo szeroki zakres przeprowadzonych badań, jak też bardzo dojrzały sposób ich realizacji, który daje się zauważyć w trakcie lektury recenzowanej rozprawy, wskazują na ogromne doświadczenie badawcze Doktoranta uzyskane w trakcie wykonywania pracy doktorskiej, co jest niezaprzeczalnym Jego osiągnięciem, które z pewnością przyniesie wartościowe efekty w przyszłej pracy.

5. Wnioski końcowe

Biorąc pod uwagę spostrzeżenia i wnioski wyrażone w poprzednim punkcie stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Bartłomieja Melki pt. „Coupled thermal electromagnetic numerical modeling of an effective heat dissipation process from an electric motor” spełnia wymagania określone w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule

w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. 2003 Nr 65 poz. 595, z późn. zmianami) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Oprócz wcześniej wymienionych, biorąc pod uwagę takie fakty, jak:

- pozytywna ocena prac badawczych mgra inż. Bartłomieja Melki przez recenzentów i ich publikacja w renomowanych czasopismach naukowych (Energy, Int. J. of Thermal Sciences, IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers),
- opracowanie modelu sprzężenia zjawisk cieplnych i elektromagnetycznych, który może mieć zastosowanie nie tylko w badanych urządzeniach, ale także np. w procesach ogrzewania mikrofalowego czy też oddziaływań laserowych o dużych mocach,
- wykazanie sprawności w prowadzeniu eksperymentów fizycznych, co – w dobie popularności symulacji komputerowych jako podstawowego narzędzia badawczego – należy uznać za szczególnie wartościowe doświadczenie Doktoranta

wnioskuję o rozważenie przez Komisję Doktorską wyróżnienia rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartłomieja Melki.

