

Bartłomiej Melka

**Coupled thermal electromagnetic numerical
modelling of an effective heat dissipation
process from an electric motor**

Ph.D. Thesis

Institute of Thermal Technology
Faculty of Energy and Environmental Engineering
Silesian University of Technology
Gliwice, Poland, 2019



Author:

Bartłomiej Melka, M.Sc.
Silesian University of Technology
Faculty of Energy and Environmental Engineering
Institute of Thermal Technology
S. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice, Poland
e-mail: *Bartlomiej.Melka@polsl.pl*

Supervisor:

Jacek Smoła, Ph.D., D.Sc.
Associate Professor at Silesian University of Technology
Faculty of Energy and Environmental Engineering
Institute of Thermal Technology
S. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice, Poland
e-mail: *Jacek.Smolka@polsl.pl*

Co-supervisor:

Janusz Hetmańczyk, Ph. D.
Faculty of Electrical Engineering
Department of Power Electronics, Electrical Drives and Robotics
B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, Poland
e-mail: *Janusz.Hetmanczyk@polsl.pl*

Polish title:

*Sprężony cieplno - elektromagnetyczny model numeryczny
procesu efektywnego rozpraszania ciepła z silnika elektrycznego*

Reviewers:

Maciej Jaworski, Ph.D., D.Sc.
Associate Professor at Warsaw University of Technology
Faculty of Power and Aeronautical Engineering
Institute of Heat Engineering
Nowowiejska 21/25, 00-665 Warsaw, Poland
e-mail: *Maciej.Jaworski@itc.pw.edu.pl*

Mariusz Rząsa, Ph.D., D.Sc.
Associate Professor at Opole University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Department of Thermal Engineering and Industrial Facilities
S. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, Poland
e-mail: *M.Rzasa@po.opole.pl*

Sprężony ciepło - elektromagnetyczny model numeryczny procesu efektywnego rozpraszania ciepła z silnika elektrycznego

Bartłomiej Melka
Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska,
Gliwice, Poland, Bartlomiej.Melka@polsl.pl

Tendencje środowiskowe i polityczne skłaniają współczesny przemysł do ograniczenia wykorzystania nieodnawialnych źródeł energii w celu złagodzenia antropogenicznej degradacji środowiska. Prowadzi to, np. do zwiększenia znaczenia napędów elektrycznych w transporcie i innych gałęziach przemysłu kosztem silników spalinowych, które charakteryzują się niższą sprawnością konwersji energii. W tej sytuacji proces budowy silników elektrycznych powinien opierać się na najlepszych praktykach inżynierskich, które wykorzystują analizy wielofizyczne. W procesie projektowania silników elektrycznych ważną rolę powinna odgrywać analiza cieplna, gdyż pozwala na zidentyfikowanie miejsc, w których występuje maksymalna temperatura. Ponadto konstrukcja silnika powinna być również zabezpieczona przed osiągnięciem temperatury wyższej niż dopuszczalna, co może prowadzić do awarii maszyny. Jest to szczególnie ważne w przypadku elementów silnika, takich jak izolacja uzwojeń. Warto też zauważyć, że analiza termiczna pozwala na zmniejszenie wielkości maszyny, a tym samym pozwala na redukcję kosztów wykorzystanych materiałów. Z drugiej strony wprowadzone na podstawie analizy termicznej elementy, które intensyfikują rozpraszanie ciepła, pozwalają na przeciążenie maszyny i obniżenie temperatury poszczególnych elementów silnika, np. uzwojeń. Wynika to z faktu, że wielkość strat miedzi jest związana z rezystancją uzwojeń zależnych od temperatury. W związku z tym optymalizacja cieplnego zachowania silnika może również prowadzić do zmniejszenia strat miedzi w maszynie. W rezultacie niższa temperatura wewnętrznych elementów silnika może również zapewnić utrzymanie punktu pracy poza rozmagnesowaniem magnesów stałych w silnikach takich jak bezszczotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi (ang. Permanent Magnet Brushless DC). Wszystko to oznacza, że analiza termiczna powinna być zawsze uwzględniana w procesie projektowania silników elektrycznych.

Zatem głównym celem pracy doktorskiej jest analiza termiczna wybranego silnika małej mocy typu PM BLDC. W pracy zaproponowano intensyfikację rozpraszania ciepła w oparciu o techniki pasywne, a następnie zweryfikowano je eksperymentalnie i numerycznie.

W pracy opisano badania eksperymentalne związane z analizą cieplną wybranego silnika elektrycznego. Procedury pomiarowe przedstawiono jako dwie niezależne kampanie eksperymentalne przeprowadzane na przeznaczonym do tego celu stanowisku badawczym. Pierwsza z nich koncentrowała się na pomiarach prędkości powietrza wewnątrz i wokół analizowanego silnika, a także na pomiarach temperatury. W pierwszej kampanii eksperymentalnej anemometrii o stałej temperaturze ustawiono w 28 pozycjach w celu zebrania wartości składowej pionowej prędkości gorącego powietrza nad silnikiem zainstalowanym na stanowisku badawczym. Ponadto w tylnej części badanego silnika zarejestrowano dwie składowe prędkości za pomocą techniki laserowej anemometrii dopplerowskiej (ang. Laser Doppler Anemometry). Podczas pierwszej kampanii wykonano również pomiary termiczne z wykorzystaniem zestawu 22 skalibrowanych termopar. Pomiary temperatury i prędkości pozwoliły na zbadanie zjawiska konwekcji swobodnej biorącej udział w rozpraszaniu strat mocy z analizowanego silnika. Pierwsza kampania eksperymentalna pozwoliła zmierzyć 11 punktów pracy silnika, natomiast w drugiej koncentrowano się wyłącznie na pomiarach termicznych z wykorzystaniem zestawu skalibrowanych termopar i kamery termowizyjnej. W ramach tej kampanii badano różne pasywne koncepcje intensyfikacji rozpraszania ciepła z sil-

nika. Podczas drugiej kampanii eksperymentalnej zarejestrowano 6 punktów pracy dla każdego wariantu poprawy rozpraszania ciepła.

Część doświadczalna badań została wykorzystana do walidacji stworzonych modeli w technice obliczeniowej dynamiki płynów (ang. Computational Fluid Dynamics – CFD). Modele te zostały sformułowane na podstawie skomplikowanej geometrii silnika elektrycznego. Pierwszy z modeli cieplnych został zdefiniowany, a następnie zwalidowany w warunkach występujących w pierwszej kampanii eksperymentalnej. Drugi model cieplny został stworzony, a następnie zwalidowany na podstawie drugiej kampanii eksperymentalnej. Ponadto obejmował on proponowane intensyfikacje rozpraszania ciepła. Modele opierały się na standardowych równaniach stosowanych w CFD, natomiast wiele właściwości modelu zostało zaimplementowanych za pomocą funkcji własnych użytkownika. Straty silnika zostały zaimplementowane w modelach termicznych jako objętościowe źródła ciepła przypisane do uzwojeń, rdzenia i łożysk. Źródła pochodzące z generacji ciepła Joule’a obliczono w funkcji temperatury. W pracy przedstawiono również model elektromagnetyczny pracy silnika oraz opisano procedurę jego sprzężenia z drugim modelem termicznym. Sprzężenie tych modeli pozwoliło na niezależne od eksperymentu wyznaczenie strat w maszynie oraz na ich interpolacje, jako nierównomierne źródła ciepła, z modelu EMAG do modelu cieplnego. W opracowanym modelu termicznym jednym z ważniejszych jego elementów był anizotropowy charakter przewodności cieplnej uzwojeń. Wyniki modeli numerycznych wykazały zadowalającą zgodność z przeprowadzonym eksperymentem.

W niniejszej rozprawie badano trzy sposoby poprawy rozpraszania ciepła z uzwojeń silników elektrycznych. W pierwszym etapie zastosowano cienką warstwę grafitu, charakteryzującą się wysoką emisyjnością, w celu zwiększenia promieniowania cieplnego z analizowanego silnika. W kolejnym etapie przetestowano koncepcję zewnętrznej rozbudowy powierzchni za pomocą różnych typów radiatorów. Ostatnim sposobem intensyfikacji rozpraszania ciepła było wprowadzenie materiału wypełniającego w wolne strefy stojana. Te trzy koncepcje zostały przetestowane podczas drugiej kampanii eksperymentalnej i przy użyciu drugiego modelu numerycznego. Zbadano również kombinację najbardziej efektywnych metod.

Średnie temperatury uzwojeń, które zostały zmierzone podczas eksperymentu przeprowadzonego bez metod intensyfikacji odprowadzania ciepła, osiągnęły temperaturę o 68 K wyższą od temperatury w pomieszczeniu. Model numeryczny pozwolił na uzyskanie wyników temperatury na bardzo podobnym poziomie jak podczas pierwszej kampanii pomiarowej. Pierwszy wariant poprawy rozpraszania ciepła polegał na pokryciu zewnętrznych powierzchni maszyny materiałem o wysokiej emisyjności, co pozwoliło na obniżenie temperatury uzwojeń o około 4 K, do poziomu 64 K powyżej temperatury otoczenia. Opisany pierwszy sposób poprawy rozpraszania ciepła towarzyszył kolejnym modyfikacjom wprowadzonym w kolejnych wariantach. Drugi wariant poprawy rozpraszania ciepła polegał na zastosowaniu dwóch typów radiatorów na zewnętrznych powierzchniach silnika. Zastosowanie pierwszego radiatora, charakteryzującego się mniejszą powierzchnią zewnętrzną, pozwoliło na obniżenie temperatury uzwojeń o 9 K w porównaniu ze stanem początkowym bez metod poprawy odprowadzania ciepła. Zastosowanie drugiego radiatora o większej powierzchni zewnętrznej spowodowało obniżenie temperatury uzwojenia o 16 K. Spadek ten również odnosił się do temperatury pomieszczenia w porównaniu z przypadkiem bez modyfikacji. W kolejnym wariantcie zastosowano wypełniacz termoprzewodzący w wolnej przestrzeni stojana, co pozwoliło na obniżenie średniej temperatury uzwojeń o 18 K w odniesieniu do temperatury otoczenia i w porównaniu z przypadkiem sprzed modyfikacji. Ostatnia testowana modyfikacja silnika przeprowadzona została również z wypełnieniem termoprzewo-

dzącym oraz z większym radiatorem. Połączenie tych metod pozwoliło na obniżenie temperatury o ok. 30 K w stosunku do pierwotnej konstrukcji silnika i w odniesieniu do temperatury otoczenia, a zatem najskuteczniejszym sposobem intensyfikacji rozpraszania ciepła było połączenie kilku zaprezentowanych metod. Wszystkie wyniki numeryczne badanych wariantów wykazały zadowalającą zgodność z przeprowadzonymi pomiarami, podczas gdy największe rozbieżności zaobserwowano w przypadku koncepcji z wypełnieniem termoprzewodzącym.