

Bartłomiej Będkowski, BOBRME KOMEL, Katowice
Jerzy Madej, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała

MOŻLIWOŚCI METOD 3D FEM I CFD W ANALIZIE SYSTEMÓW CHŁODZENIA MASZYN ELEKTRYCZNYCH – CZĘŚĆ WSTĘPNA

THE POTENTIAL OF 3D FEM AND CFD METHODS FOR COOLING SYSTEMS ANALYSIS OF ELECTRICAL MACHINES - THE PREMISES

Abstract: The use of 3D finite element method (FEM) and Computational fluid dynamics (CFD) for thermal and flow analysis of electrical machines cooling systems are discussed in the paper. The qualities and defects of these methods are shown. For simple example analysis of cooling system with different types of fans, the *FEMAP v10.2* with *TMG* panel program is used. The simple thermal analysis of high speed permanent magnet electrical machine is presented. The future practical applications of these methods in design process of electrical machines are discussed. The comparison of the thermal experimental results of a fully instrumented special application machine with the numerical analysis results will be shown in the next part of article.

1. Wstęp

W powszechnie stosowanej praktyce projektowania maszyn elektrycznych rolę odgrywała dotychczas analiza zjawisk elektromagnetycznych, mniejszą natomiast uwagę poświęcano analizie termicznej. Jednak rozwiązania konstrukcyjne stawiające coraz większe wymagania dotyczące zwiększenia sprawności, miniaturyzacji i redukcji kosztów oraz stosowanie elementów wrażliwych na wzrost temperatury (takich jak magnesy trwałe, enkodery, uszczelnienia, czy łożyskowanie), zmuszają projektantów do zwrócenia większej uwagi na zjawiska przepływu i odprowadzania ciepła. Wiąże się to z koniecznością przeprowadzenia wnikliwej analizy zjawisk termicznych, możliwej do przeprowadzenia między innymi dzięki nowoczesnym metodom obliczeniowym.

2. Przegląd nowoczesnych metod obliczeń cieplnych maszyn elektrycznych

Wśród coraz częściej stosowanych obecnie metod analizy termicznej maszyn elektrycznych można wyodrębnić dwa rodzaje. Pierwszy to najczęściej i najchętniej stosowana metoda analityczna tzw. schematów cieplnych, drugi rodzaj to metody numeryczne Komputerowej Analizy Dynamiki Płynów (CFD) korzystające najczęściej z Metody Elementów Skończonych (FEM).

2.1. Metoda schematów cieplnych

Analityczna metoda schematów cieplnych jest obecnie najbardziej rozpowszechnioną metodą, która pozwala otrzymać potwierdzone do-

świadczalnie wyniki w stosunkowo krótkim czasie. Metoda ta wymaga jednak włożenia dużego wysiłku w opracowanie modelu schematu cieplnego (sieciowego) ściśle odpowiadającego analizowanemu urządzeniu. Przykładem programu korzystającego z tej metody jest *Motor-CAD*. Termiczne obliczenia statyczne i dynamiczne bazują właśnie na analizie budowanych przez *Motor-CAD* zastępczych schematów cieplnych. Stosowany przez *Motor-CAD* algorytm matematyczny pozwala na efektywne i dokładne obliczenia naturalnej i wymuszonej konwekcji, chłodzenia płynem, promieniowania oraz przewodzenia ciepła. Jego bogate biblioteki wewnętrzne pozwalają na dość szybkie analizy szerokiej gamy rozwiązań urządzeń elektrycznych o różnych rodzajach chłodzenia.

2.2. Metoda elementów skończonych i komputerowej dynamiki płynów

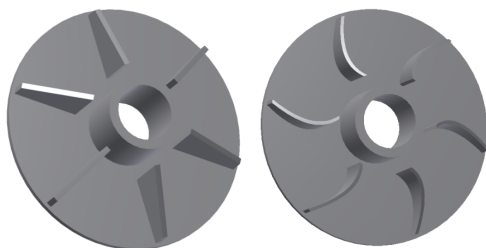
Alternatywna analiza oparta na metodzie elementów skończonych oraz komputerowej analizie dynamiki płynu jest dużo wolniejsza i wymaga dużej mocy obliczeniowej, ale jej dużą zaletą jest to, że pozwala analizować urządzenia o niemalże dowolnej geometrii i systemach chłodzenia. Ograniczeniem metody są jedynie możliwości obliczeniowe posiadanego sprzętu komputerowego. CFD i FEM pozwalają na efektywną analizę przepływu ciepła, gazów i cieczy w otoczeniu maszyny oraz w jej wnętrzu, dając praktycznie nieograniczone możliwości analizy różnego rodzaju systemów chłodzenia maszyn i urządzeń elektrycznych.

3. Możliwości *FEM* i *CFD* w analizie systemów chłodzenia maszyn elektrycznych

Celem rozpoznania możliwości jakie w zakresie przeprowadzenia analizy termicznej maszyn elektrycznych oferują metody obliczeniowe, zbudowano schematyczny model małego silnika o wymiarach zbliżonych do maszyn elektrycznych o wzniosie 70mm i mocy około 1kW, chłodzonych przewietrznikiem promieniowym osadzonym na wale (rys. 1). Do chłodzenia silnika zamodelowano również proste modele przewietrzników przedstawione na (rys. 2). Rozważane modele wykonano w systemie modelowania komputerowego *Inventor*. Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano program *FEMAPv10.2* wyposażony w wyspecjalizowany moduł *TMG* umożliwiający wykonanie zaawansowanych analiz przepływu.



Rys. 1. Uproszczony model silnika o wzniosie 70mm i mocy około 1kW

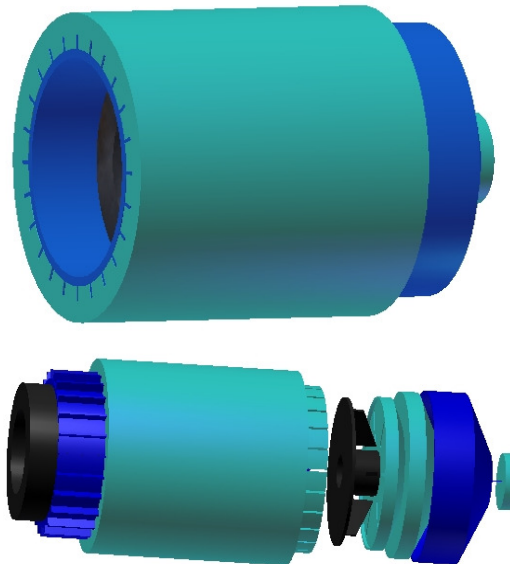


Rys.2. Uprozczone modele przewietrzników promieniowych

3.1. Przykład analizy przewietznika

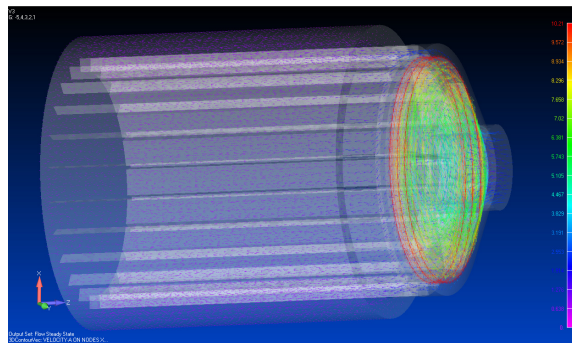
Zgodnie z wymaganiami programu *FEMAP* dotyczącymi przeprowadzanej analizy, do modelu silnika został dołączony model odpowiadający medium chłodzącemu o właściwościach powietrza (rys. 3). W celu określenia wpływu rodzaju przewietrzników na analizę przepływu powietrza i ciepła, rozważono dwa przewietzniki promieniowe (rys. 2) z łopatkami prostymi i profilowanymi, dla tego drugiego uwzględniając również zmianę kierunku obrotów maszyny. Podczas analizy przyjęto straty ciepła

w urządzeniu na poziomie 250W przekazywane przez stojan oraz założono prędkość obrotową wału 1500obr/min. Przyjęto temperaturę i ciśnienie otoczenia odpowiednio 20°C i 1013hPa.



Rys. 3. Model silnika przygotowany do analizy w programie *FEMAPv10.2*

Model numeryczny zbudowano w programie *FEMAP* używając liniowych, tetragonalnych elementów bryłowych. Warunki brzegowe zostały wprowadzone za pośrednictwem modułu *TMG*, w którym również została wykonana analiza transportu masy i energii.

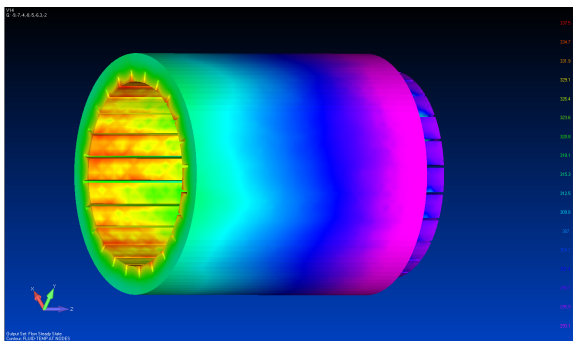


Rys.4. Rozkład wektorów prędkości powietrza dla obrotów silnia 1500obr/min

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład wektorów prędkości powietrza dla 1500obr/min. Maksymalna prędkość przepływu powietrza występuje w górnej krawędzi łopatki przewietznika i wynosi około 10m/s. Celem porównania przeprowadzono również analizę dla 750 obr/min. Dla tej ilości obrotów maksymalna prędkość powietrza wynosiła około 5m/s. Kształt łopatek nie miał istotnego wpływu na maksymalną prędkość strugi powietrza. Rozkład wektorów

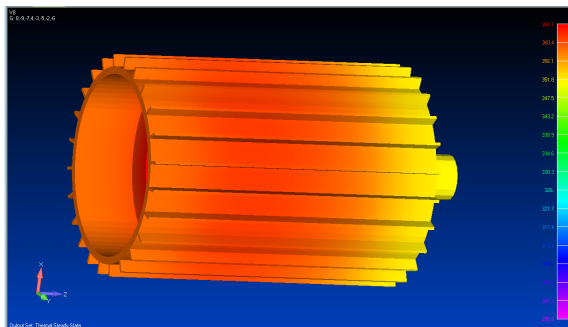
prędkości w czytelny sposób ukazuje charakter przepływu czynnika chłodzącego.

Rysunek 5 pokazuje rozkład temperatury powietrza otaczającego kadłub dla prędkości obrotowej 1500obr/min. Maksymalna temperatura powietrza opływającego przy powierzchni kadłuba występuje w miejscu, gdzie prędkość strugi jest najmniejsza i wynosi około 70°C. Podobną analizę przeprowadzono również dla prędkości 750obr/min i temperatura powietrza przy powierzchni osiągnęła maksymalną wartość równą 125°C. Zmiana kształtu łopatek i kierunku obrotów powoduje maksymalnie wahania temperatury w zakresie 5°C.



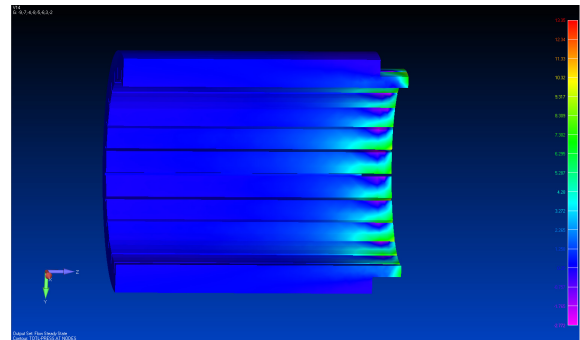
Rys. 5. Rozkład temperatury powietrza wokół kadłuba dla obrotów silnia 1500 obr/min

Rysunek 6 pokazuje rozkład temperatury kadłuba dla prędkości obrotowej 1500obr/min. Maksymalna temperatura kadłuba wynosi około 85°C i analogicznie jak w poprzednim przypadku występuje w miejscu, w którym prędkość strugi opływającego powietrza jest najmniejsza. Podobną analizę przeprowadzono także dla prędkości 750obr/min i temperatura kadłuba osiągnęła maksymalną wartość równą 130°C. Zmiana kształtu łopatek i kierunku obrotów powoduje podobnie jak w poprzednim przypadku maksymalnie wahania temperatury w zakresie 5°C.



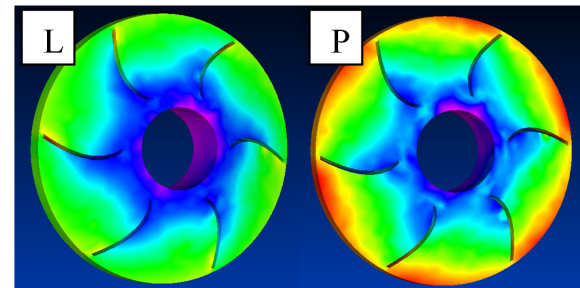
Rys. 6. Rozkład temperatury kadłuba dla obrotów silnia 1500obr/min

Rysunek 7 przedstawia rozkład ciśnienia wokół kadłuba wywołanego pracą przewietrznika w odniesieniu do ciśnienia otoczenia.



Rys. 7. Rozkład ciśnienia wokół kadłuba

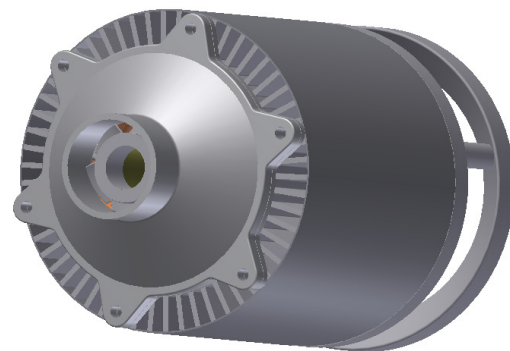
Rozkład ciśnienia wokół przewietrznika o profilowanych łopatkach dla różnych kierunków obrotów pokazano na rysunku 8. Dla obrotów L(ewych) maksymalne nadciśnienie wynosi około 55Pa, natomiast dla obrotów P(rawy) około 35Pa.



Rys. 8. Rozkład ciśnienia wokół przewietrznika dla obrotów prawych i lewych

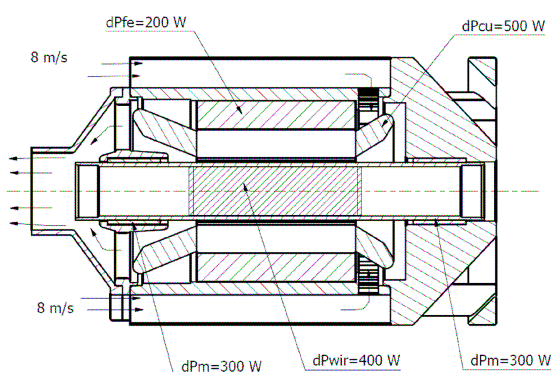
3.2. Przykład uproszczonej analizy generatora wysokoobrotowego z magnesami trwałymi

Poniżej przedstawiono również analizę kompletnego generatora wysokoobrotowego z magnesami trwałymi o mocy 65kW (rys. 9).



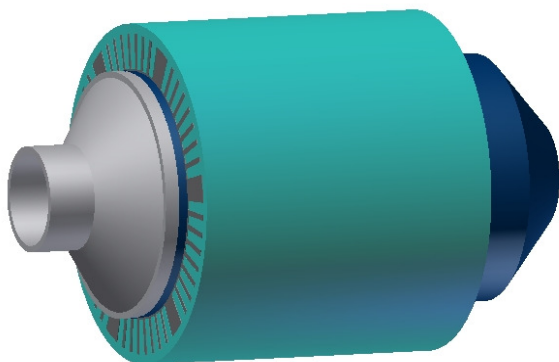
Rys. 9. Uproszczony model generatora

Analizę przeprowadzono przyjmując warunki otoczenia jak poprzednio, temperatura 20°C i ciśnienie 1013hPa . Przyjęto następujące straty w maszynie (rys. 10): straty mechaniczne 600W (po 300W na łożysko), straty w wirniku 400W , straty w uzwojeniu 500W , straty w żelazie 200W . W wyniku uproszczenia modelu straty uzwojenia założono w żłobkach stojana. Wielkość strumienia powietrza chłodzącego skierowanego na uźebrowanie kadłuba ustalono na poziomie 8m/s . Założono odpowiedni kontakt między elementami urządzenia i konwekcję pomiędzy elementami maszyny, a powietrzem opływającym kadłub.



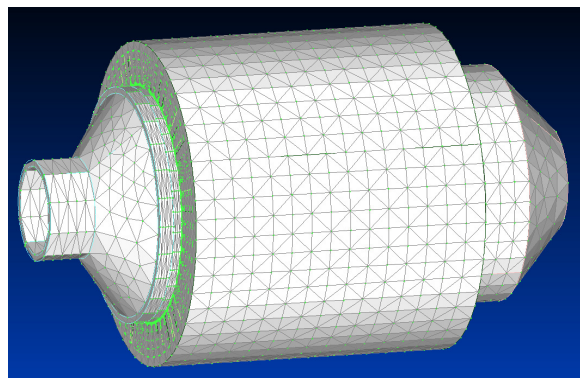
Rys. 10. Przyjęte straty do obliczeń cieplnych

Rysunek 11 przedstawia model CAD, który przygotowano do analizy w *FEMAP*'ie. Na rysunku tym można zauważyć zastosowane uproszczenia w geometrii modelu, wprowadzone w celu łatwiejszego zbudowania modelu numerycznego i zmniejszenia ilości elementów skończonych. Widoczny jest także model powietrza opływającego kadłub.



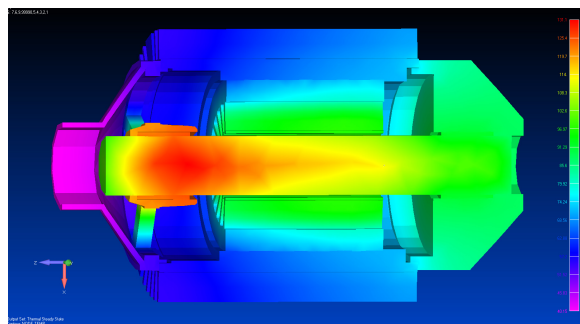
Rys. 11. Opracowany uproszczony model CAD generatora

Czas analizy tak skomplikowanego modelu (rys. 12) na zastosowanej stacji roboczej wynosił około 12 min.



Rys. 12. Model numeryczny generatora

Wyniki analizy dla stanu ustalonego maszyny przedstawia rysunek 13. Maksymalna temperatura przy jednym z łożysk wynosi około 130°C , średnia temperatura na kadłubie około 70°C .



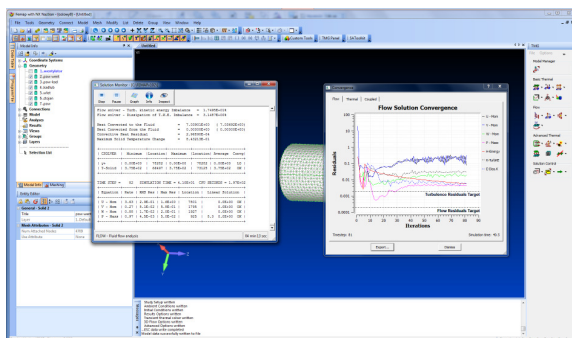
Rys. 13. Obliczony rozkład temperatury w generatorze dla założonych strat przy temperaturze otoczenia 20°C

4. Wady i zalety zastosowanej metody obliczeniowej

Podstawową zaletą metod numerycznych jest niewątpliwie ich elastyczność i możliwości ograniczone praktycznie jedynie mocą obliczeniową sprzętu komputerowego. W wyniku przeprowadzonych analiz otrzymujemy obraz przepływu medium chłodzącego wraz z rozkładem prędkości i ciśnienia oraz temperaturą w dowolnym punkcie analizowanego obszaru. Nie jest wymagana znajomość charakterystyki przewietrznika, gdyż w oparciu o jego model 3D można ją wyznaczyć w trakcie trwania procesu obliczeniowego. Dzięki zastosowaniu FEM w analizie termicznej można otrzymać rozkład temperatury w całej maszynie.

Niestety metody numeryczne mają też swoje wady. Oprócz długiego czasu obliczeniowego, jaki występuje w przypadku skomplikowanych

geometrii maszyny, na jakość i zbieżność obliczeń ma również wpływ odpowiedni podział geometrii na elementy skończone (rys. 14). Stały rozwój programów do przeprowadzania analiz numerycznych przepływów, stwarza jednak nadzieję, że wymienione problemy będą występować coraz rzadziej.



Rys. 14. Problemy ze zbieżnością obliczeń

5. Możliwości zastosowania FEM, CFD w procesie projektowania maszyn elektrycznych

Wyniki uzyskiwane podczas analiz termicznych wykorzystujących metody numeryczne z powodzeniem mogą być przydatne do wyznaczenia naprężeń termicznych, a także naprężeń wynikających z naporu czynnika chłodzącego na elementy urządzenia elektrycznego. Dzięki temu konstrukcje mogą być optymalizowane już na etapie projektowania. Aktualnie większość programów do modelowania 3D jest wyposażona w narzędzia do analizy numerycznej typowych zagadnień mechanicznych, kwestią czasu jest więc powszechne uzupełnienie ich również o możliwości prowadzenia równocześnie analiz przepływowych.

6. Podsumowanie

Możliwości zastosowania metod numerycznych FEM i CFD w analizie systemów chłodzenia maszyn elektrycznych pozwalają na analizę termiczną nawet bardzo skomplikowanych maszyn. Wyniki z symulacji stwarzają obraz pracy maszyny, co pozwala ją zoptymalizować biorąc pod uwagę różnorodne rodzaje obciążeń. Rozwój tego typu aplikacji i sprzętu komputerowego spowoduje, że w krótkim czasie staną się one jednym z głównych narzędzi wykorzystywanych powszechnie podczas procesu projektowania nowych urządzeń, czy modernizowania istniejących.

Istotnym elementem z punktu widzenia dalszych prac nad podjętym tematem jest przepro-

wadzenie weryfikacji doświadczalnej uzyskanych wyników, którą autorzy mają zamiar wkrótce przeprowadzić.

7. Literatura

- [1]. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D., Shanel M., Mueller M., Mejuto C.: *Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machine*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 3, pp. 871-882, March 2009.
- [2]. Dorrell D. G., Staton D. A., Hahout J., Hawkins D., McGilp M. I.: *Linked Electromagnetic and Thermal Modelling of a Permanent Magnet Motor*. PEMD Servo Motor Thermal Analysis, 2006.
- [3]. Staton D., Hawkins D., Popescu M.: *Motor-CAD Software for Thermal Analysis of Electrical Motors-Links to Electromagnetic and Drive Simulation Model*. CWIEME, Berlin, 22-24 June 2010.
- [4]. Szczypior J., Jakubowski R.: *Obliczenia cieplne w bezrdzeniowej maszynie dyskowej z magnesami trwałymi o chłodzeniu bezpośrednim*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 83, 2009, wyd. BOBRME Komel, s. 59-66.
- [5]. <http://www.termagsoft.com.pl/Cad1.html>, styczeń 2012.

Autorzy

mgr inż. Bartłomiej Będkowski
 b.bedkowski@komel.katowice.pl
 Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy
 Maszyn Elektrycznych „KOMEL”
 40-203 Katowice
 al. Roździeńskiego 188

prof. ATH dr hab. inż. Jerzy Madej
 juma@ath.bielsko.pl
 Akademia Techniczno-Humanistyczna
 Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
 Katedra Podstaw Budowy Maszyn
 43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2