

# Numeryczne i termograficzne badania przewodzenia ciepła przez ożebrowaną obudowę silnika elektrycznego

## Numerical and thermography study of heat conduction through the finned motor housing

JACEK WERNIK  
KRZYSZTOF J. WOŁOSZ  
MIROSLAW GRABOWSKI\*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.326

Omówiono wykonane badania dotyczące przewodzenia ciepła przez ożebrowaną obudowę silnika o mocy 5,5 kW. Stworzono model 3D obudowy, który dla założonych warunków granicznych stał się przedmiotem analizy numerycznej w programie COMSOL Multiphysics, bazującym na metodzie elementów skończonych. W celu zweryfikowania poprawności modelu numerycznego obiekt rzeczywisty poddano badaniom termograficznym, a następnie otrzymane termogramy porównano z rozkładami temperatury wyznaczonymi komputerowo.

**SŁOWA KLUCZOWE:** symulacje numeryczne, ożebrowana obudowa silnika, termografia

*The article describes research work on heat transfer through the finned 5.5 kW electric motor housing wall. A three dimensional model has been produced for numerical simulation with boundary conditions applied with Finite Element Method applied using COMSOL Multiphysics programme. Results were visualized by e.g. temperature field distribution. Thermography study was carried out on a real object in order to appraise correctness of numerical model. Obtained thermal photograph of the finned housing was compared to the temperature field distribution which was calculated numerically.*

**KEYWORDS:** numerical simulations, finned housing, thermography

W projektowaniu urządzeń i maszyn istotne jest nadanie im racjonalnej konstrukcji – obecnie to zadanie jest łatwiejsze dzięki różnorodnym technikom komputerowego wspomaganie prac inżynierskich, a zwłaszcza dzięki metodom numerycznym, które w ostatniej dekadzie dynamicznie się rozwinęły.

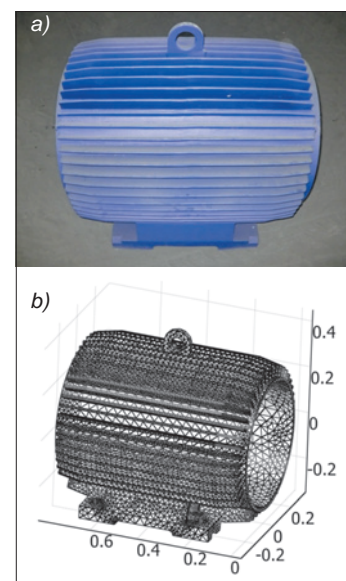
Komputerowe narzędzia pozwalają na skrócenie etapu projektowania urządzenia, jednak kluczową kwestią jest w tym przypadku weryfikacja projektu – albo przez testy przemysłowe na prototypie urządzenia, albo przez badania laboratoryjne. Dopiero po pozytywnym zweryfikowaniu modelu komputerowego można optymalizować konstrukcję ze względu na określone kryteria.

W niniejszym artykule pokazano sposób weryfikacji wyników numerycznych (otrzymanych z wykorzystaniem metody elementów skończonych) przez ich porównanie z wynikami uzyskanymi w badaniach termograficznych. Podczas rozruchu, regulacji prędkości obrotowej i pracy silnika elektrycznego pierścieniowego następuje wydzielanie się ciepła. Ożebrowanie obudowy silnika poprawia skuteczność chłodzenia i pomaga w odprowadzaniu ciepła (dzięki większemu polu powierzchni odprowadzającej ciepło). Badania prowadzono na ożebrowanym kadłubie typowego silnika elektrycznego o mocy 5,5 kW.

### Numeryczne wyznaczenie rozkładu temperatury

Przykłady zastosowania metod numerycznych, a zwłaszcza metody elementów skończonych, opisano w [1]. Szerszy przegląd metod z zakresu analizy termicznej silników elektrycznych przedstawiono w pracy [2]. Ogólnie rozwiązanie konkretnego zadania naukowego lub inżynierskiego metodą elementów skończonych składa się z dwóch odrębnych etapów: stworzenia modelu obliczeniowego i rozwiązania zadania z wykorzystaniem tego modelu.

Symulacje numeryczne przeprowadzono w programie COMSOL Multiphysics [3]. Model 3D obudowy silnika po uproszczeniu wczytano do preprocesora programu i podzielono na elementy tetragonalne. Rzeczywisty obiekt oraz jego model numeryczny (z siatką 79574 elementów skończonych) przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Obiekt rzeczywisty (a) i model numeryczny ożebrowanej obudowy silnika z trójwymiarową siatką elementów skończonych (b)

Podstawową strukturą matematyczną w COMSOL Multiphysics jest system równań różniczkowych cząstkowych. Teoria zagadnień dotyczących przewodzenia ciepła stanowi gałąź matematyki stosowanej i sprowadza się do rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych dla różnorodnych warunków brzegowych. Matematyczny model wymiany ciepła przez przewodzenie wyraża się równaniem:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q$$

gdzie:  $T$  – temperatura w K,  $\rho$  – gęstość w  $\text{kg/m}^3$ ,  $C$  – ciepło właściwe w  $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ,  $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła w  $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ,  $Q$  – źródło ciepła w J,  $\nabla$  – operator nabla.

\* Dr inż. Jacek Wernik (wernik@pw.plock.pl), dr inż. Krzysztof J. Wołosz (krzysztof.wołosz@pw.plock.pl), dr inż. Mirosław Grabowski (mirek@pw.plock.pl) – Politechnika Warszawska Filia w Płocku, Centrum Doskonałości CERED

W stanie ustalonym, gdy temperatura nie zmienia się w czasie, pierwszy człon równania jest równy zero, a gęstość przewodzenia strumienia ciepła – wprost proporcjonalna do gradientu temperatury.

Różniczkowe równania przewodzenia ciepła mają dowolnie dużą liczbę rozwiązań, co wyraża się w dowolności stałych całkowania. Aby spośród tych rozwiązań wybrać te właściwe dla danych warunków wymiany ciepła, należy określić warunki jednoznaczności, tj.:

- warunki geometryczne (kształt i wymiary obudowy),
- właściwości fizyczne materiału obudowy – żeliwa szarego (gęstość, współczynnik przewodzenia ciepła) – oraz ich zależność od temperatury,

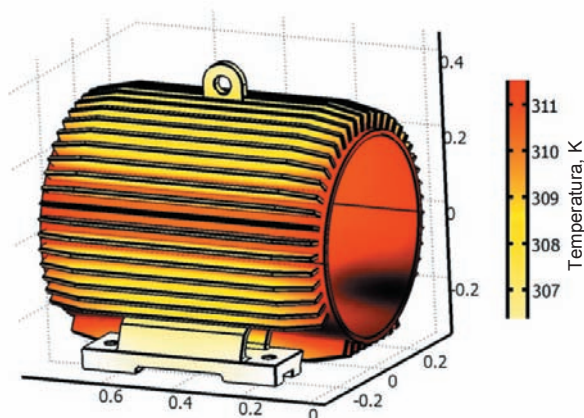
a także warunki graniczne, czyli:

- warunki początkowe określające rozkład temperatury w wybranej chwili, która jest traktowana jako początkowa,
- warunki brzegowe określające warunki wymiany ciepła na zewnętrznych powierzchniach obudowy.

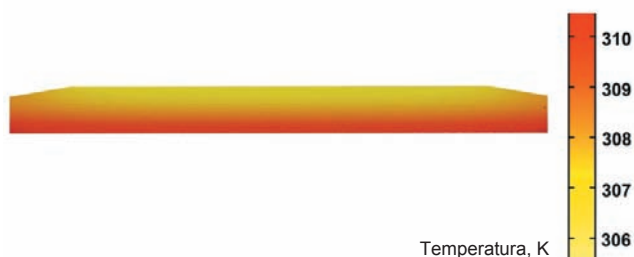
Model pokazany na rys. 1 wykorzystano do przeprowadzenia numerycznej symulacji wymiany ciepła. Moc rozpatrywanego trójfazowego indukcyjnego silnika pierścieniowego ogólnego przeznaczenia wynosiła 5,5 kW. Określenie całkowitych strat energii, zamienianej w silniku elektrycznym na ciepło, jest złożonym zagadnieniem [4]. W czasie pracy silnika taka przemiana zachodzi zarówno w wirniku i stojanie, jak i w dodatkowych elementach. Na potrzeby badań przyjęto założenie stosowane zazwyczaj przez biura konstrukcyjne, czyli że 5% mocy silnika odprowadzana jest w postaci ciepła na zewnątrz silnika. Pozostałe założenia były następujące:

- współczynnik przewodzenia ciepła dla żeliwa szarego 45 W/m·K,
- współczynnik wnikania ciepła do otoczenia 30 W/m<sup>2</sup>K,
- temperatura otoczenia 288 K,
- moc cieplna na wewnętrznej powierzchni obudowy 275 W.

Analizując wartości temperatury otrzymane w symulacjach numerycznych, można zauważyć, że na odcinku podstawa – czoło żeber wartości te mieszczą się w przedziale 310÷306 K (rys. 2). Na rys. 3 przedstawiono rozkład temperatury w przekroju wzdłużnym pojedynczego żebra prostego. Jest on



Rys. 2. Numerycznie wyznaczony rozkład temperatury w obudowie silnika



Rys. 3. Rozkład temperatury w przekroju wzdłużnym żebra

zgodny z matematycznymi opisami przewodzenia ciepła przez tzw. żebro krótkie [5].

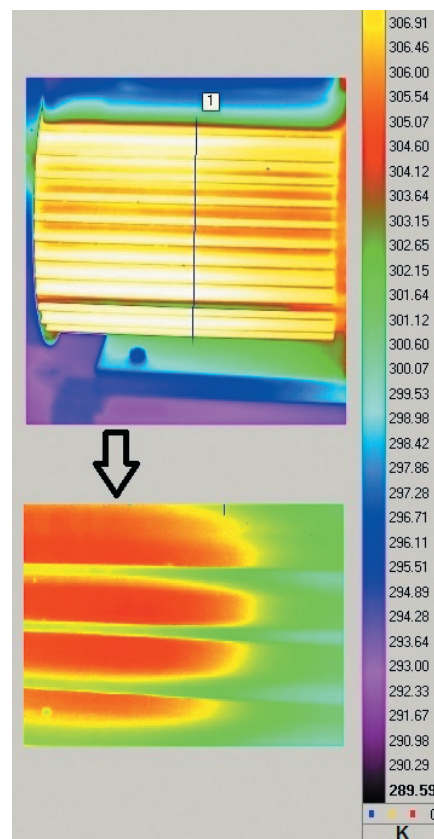
Rozwiązanie uzyskane w symulacjach numerycznych nie oznacza jednak faktycznego rozwiązania problemu. Trzeba bowiem pamiętać, że wyniki numeryczne prawie zawsze są obciążone błędami. Wynikają one przede wszystkim z:

- błędów modelowania (przyjęty model matematyczny nie odzwierciedla dokładnie rzeczywistości) oraz błędów dotyczących wartości współczynników przyjętych w równaniach różniczkowych cząstkowych i warunkach brzegowych (chodzi tu np. o nieprawidłowe wartości danych materiałowych czy danych dotyczących interakcji obiektu z otoczeniem),
- błędów numerycznych (błędów dyskretyzacji wynikających z zastosowanej metody aproksymacji),
- błędów zaokrągleń (ze względu na ograniczoną dokładność reprezentacji liczb w komputerze rozwiązanie numeryczne nie odpowiada rozwiązaniu przybliżonemu dla dokładnej reprezentacji liczb).

Po uzyskaniu rozwiązania numerycznego należy je zweryfikować, a więc sprawdzić, jak wiernie model matematyczny odwzorowuje rzeczywistość.

### Termograficzne badania obudowy silnika

Termografia jest zdalną bezdotykową metodą badawczą opartą na obserwacji promieniowania podczerwonego (emitowanego przez każde ciało o temperaturze wyższej od zera absolutnego) i jego zamianie w obraz. W ten sposób można diagnozować wybrany obiekt techniczny ze względu wymianę ciepła. Istotną rolę odgrywa tu prawidłowa interpretacja otrzymanych termogramów. Jest to złożone zagadnienie, obejmujące wnioskowanie o zachodzących w badanym obiekcie zjawiskach cieplnych i związanych z nimi cechach obiektu. Trzeba pamiętać, że na temperaturę w danym punkcie mogą wpływać różnorodne czynniki. Należy uwzględnić fakt, że promieniowanie podczerwone odbywa się w pewnym środowisku, a do przeprowadzenia dokładnego pomiaru rozkładu temperatury konieczne jest skompensowanie oddziaływania czynników zewnętrznych.



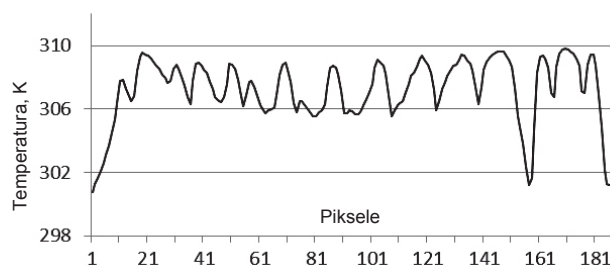
Rys. 4. Termogram badanego silnika z uźebrowaną obudową



Ponadto ważne jest właściwe przyjęcie wartości takich parametrów, jak: temperatura odbita pozorna, odległość między obiektem a kamerą, temperatura otoczenia, emisyjność badanej powierzchni.

Ostatni z parametrów ma największy wpływ na dokładność pomiaru temperatury. Emisyjność powierzchni kadłuba silnika określono doświadczalnie przez pomiar porównawczy z wykorzystaniem powierzchni o stałej, znanej emisyjności – w tym przypadku powierzchni taśmy izolacyjnej Scotch Super 33+ firmy 3M o emisyjności 0,96 (ta wartość została potwierdzona w badaniach przeprowadzonych przez autorów). W ten sposób wartość emisyjności powierzchni obudowy silnika pokrytego farbą oszacowano na 0,95.

Na rys. 4 przedstawiono termogram uźebrowanej obudowy silnika uzyskany za pomocą kamery FLIR SC7600. Wartości temperatury w poszczególnych punktach można łatwo przedstawić w układzie: odległość (wyrażona w pikselach) – temperatura (wyrażona w Kelwinach). Linia oznaczona jako 1 na rys. 4 odpowiada miejscu, z którego pobrano dane – na rys. 5 zaprezentowano je w postaci wykresu. Reprezentują one wartości temperatury w kierunku poprzecznym do dłuższego wymiaru żeber umiejscowionych na obudowie.



Rys. 5. Rozkład temperatury na powierzchni obudowy silnika wzdłuż wybranej linii

## Podsumowanie

Urządzenie bądź proces można badać doświadczalnie – przez wykonanie pomiarów – lub analitycznie – np. z wykorzystaniem symulacji numerycznej. Metody numeryczne mają tę zaletę, że są szybkie i niedrogie, jednak otrzymane wyniki w dużym stopniu zależą od przyjętych założeń, dokładności przybliżeń i idealizacji modelu obliczeniowego. W praktyce inżynierskiej wyniki numeryczne weryfikuje się doświadczalnie. Rozkłady temperatury na zewnętrznej powierzchni uźebrowanej obudowy typowego silnika elektrycznego, uzyskane w symulacjach numerycznych, porównano więc z pomiarami cieplnymi obiektu rzeczywistego, przeprowadzonymi na stanowisku doświadczalnym. Wartości temperatury wynikające z termogramów zgadzały się z wartościami otrzymanymi w symulacjach numerycznych. Przykładowo wartości temperatury na czole żebra wyznaczone numerycznie i za pomocą termografii wyniosły odpowiednio 306,1 oraz 306,5 K. Stąd wniosek, że zaproponowane modele numeryczne są poprawne. Jak widać, za pomocą kamery termowizyjnej można łatwo zweryfikować modele numeryczne do badania wymiany ciepła przez obudowę silnika z żebrami prostymi.

## LITERATURA

1. Baskharone E.A. "The Finite Element Method with Heat Transfer and Fluid Mechanics Applications". New York: Cambridge University Press, 2014.
2. Boglietti A., Cavagnino A., Shanel M., Mueller M., Mejuto C. "Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 56 (2009).
3. "COMSOL Multiphysics Model Library". COMSOL AB, 2007.
4. Staton D.A., Cavagnino A. "Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Analytical Modelling of Electric Machines". *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006*. DOI: 10.1109/IECON.2006.348143.
5. Wernik J., Wołosz K.J. "Modelling and research of heat transfer in fins of the pneumatic pulsator". *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 39 (2014). DOI: 10.3303/CET1439154. ■