

## **mgr inż. Bartłomiej BĘDKOWSKI**

Doktorant w Katedrze Podstaw Budowy Maszyn  
Wydział Budowy Maszyn i Informatyki,  
Akademia Techniczno-Humanistyczna  
ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Polska,  
E-mail: bartekbedkowski@wp.pl

## **prof. ATH dr hab. inż. Jerzy MADEJ,**

Katedra Podstaw Budowy Maszyn  
Wydział Budowy Maszyn i Informatyki,  
Akademia Techniczno-Humanistyczna  
ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Polska,  
E-mail: juma@ath.bielsko.pl

## **Innowacyjna koncepcja budowy obliczeniowego modelu cieplnego dla obwodu elektromagnetycznego wirujących maszyn elektrycznych**

**Słowa kluczowe:** *obliczenia numeryczne, obliczenia cieplne, MES, eksploatacja maszyn elektrycznych,*

**Streszczenie:** Parametry eksploatacyjne oraz niezawodność wirujących maszyn elektrycznych związane są w znacznym stopniu z ich stanem cieplnym. Wysoka temperatura tych urządzeń ma wpływ na żywotność takich elementów jak łożyska, uzwojenie, oraz sprawność i możliwości ich zastosowania. Podczas analizy istniejących konstrukcji maszyn elektrycznych oraz na etapie projektowania nowych prowadzone są coraz częściej obliczenia wytrzymałościowe i termiczne. Przy obliczeniach takich powszechnie stosowana jest metoda elementów skończonych wykorzystująca przestrzenne modele obliczeniowe, w których zagadnieniem kluczowym jest sformułowanie poprawnych warunków brzegowych oraz przyjęcie właściwych uproszczeń. W celu otrzymania wyniku adekwatnego do rzeczywistej pracy analizowanego urządzenia niezbędne jest przeprowadzenie kalibracji parametrów modelu obliczeniowego. W niniejszej pracy przedstawiono innowacyjną koncepcję określania parametrów cieplnych modelu numerycznego dla najbardziej złożonej struktury maszyn elektrycznych, jaką jest obwód elektromagnetyczny. Metoda ta ma zastosowanie podczas budowy przestrzennych termicznych modeli obliczeniowych wirujących maszyn elektrycznych. Zaproponowany uproszczony monolityczny model obwodu elektromagnetycznego wraz z metodą jego kalibracji za pomocą prostego doświadczenia pozwala na szybkie przygotowanie efektywnego modelu obliczeniowego, który z powodzeniem może być użyty w programach wykorzystujących metodę elementów skończonych.

### **1. Wstęp**

Rosnące wymagania dotyczące efektywności silników elektrycznych, jak również aspekty ekonomiczne i różnorodność zastosowania spowodowały, że przy projektowaniu maszyn elektrycznych ważne są już nie tylko parametry elektryczne. Od obecnie projektowanych i produkowanych maszyn elektrycznych wymaga się coraz wyższej niezawodności, minimalizacji masy i gabarytu, wysokiej wytrzymałości oraz zapewnienia

odpowiednich parametrów dotyczących drgań, hałasu i stanu cieplnego [1, 4-6, 10]. Innymi słowy maszyny elektryczne powinny być zoptymalizowane do warunków pracy, w jakich mają być eksploatowane. Takie podejście wymusza powstawanie nowszych i coraz bardziej dopracowanych konstrukcji. Jednocześnie proces projektowania współczesnych maszyn elektrycznych wymaga od konstruktora interdyscyplinarnej wiedzy z zakresu elektrotechniki, elektroniki, wytrzymałości materiałów, termodynamiki, mechaniki płynów oraz akustyki.

Rozwój technik komputerowych i stale zwiększające się możliwości obliczeniowe przyczyniły się do rozwoju metod numerycznych i coraz większej popularności programów wspomagających pracę inżynierów konstruktorów. Umiejętne zastosowanie specjalistycznego oprogramowania w projektowaniu maszyn elektrycznych pozwala zwiększyć efektywność pracy projektowej oraz sprawność i wytrzymałość silników, przy jednoczesnym zmniejszeniu ich ciężaru, drgań, hałasu i temperatury. Na podstawie dostępnych publikacji można zauważyć, że coraz częściej do analizy konstrukcji maszyn elektrycznych naukowcy sięgają po wyrafinowane narzędzia obliczeniowe. Oprócz programów do analiz mechanicznych, coraz większego znaczenia nabierają narzędzia do analiz termicznych i przepływowych opartych o CFD lub metodę schematów cieplnych [2].

W literaturze związanej z tą tematyką można znaleźć także różne sposoby modelowania i kalibracji modeli obliczeniowych oraz problemy z tym związane [1, 4-8, 10, 12, 13, 15]. Najczęściej jednak w najnowszych publikacjach opisywane są metody budowy modelu obliczeniowego, które są wykorzystywane w obliczeniach cieplnych z wykorzystaniem schematów cieplnych [1, 4-6].

Analizy te pozwalają na opracowanie innowacyjnych rozwiązań zarówno w zakresie projektowania silników elektrycznych o dużej sprawności, jak i projektowania nowych, wydajnych sposobów ich chłodzenia. Dla różnorodnych modeli maszyn elektrycznych możliwe jest stworzenie modeli obliczeniowych, na których można przeprowadzić obliczenia cieplno-przepływowe. Najbardziej znanym i rozwijanym narzędziem do analizy termicznej maszyn elektrycznych jest oprogramowanie Motor-CAD. Wykorzystuje ono metodę schematów cieplnych, ale posiada również moduły wykorzystujące analizy MES i CFD [1, 4-8, 10, 12, 13, 15]. Jednakże bez względu na użyte narzędzie warunkiem uzyskania prawidłowego wyniku obliczeń stanu cieplnego maszyn elektrycznych jest prawidłowe określenie rzeczywistych lub zastępczych wartości parametrów cieplnych zastosowanych materiałów konstrukcyjnych oraz przygotowanie właściwego modelu obliczeniowego.

## **2. Cele i założenia pracy**

Podstawowym elementem konstrukcyjnym wirującej maszyny elektrycznej jest stojan znajdujący się we wnętrzu maszyny. W jego skład wchodzi uzwojenie wykonane z izolowanego drutu miedzianego, impregnat oraz pakiet blach elektrotechnicznych. Elementy te tworzą obwód elektromagnetyczny i są głównym źródłem ciepła a jednocześnie są odpowiedzialne za odprowadzenie energii cieplnej na zewnątrz maszyny. Z punktu widzenia technik obliczeniowych elementy te stanowią jednak skomplikowany zespół części, toteż przyjęcie odpowiedniego modelu obliczeniowego i dobranie właściwych parametrów ma ogromny wpływ efektywność obliczeń i poprawność uzyskanych wyników.

Celem niniejszej pracy jest określenie właściwych parametrów cieplnych elementarnego obwodu elektromagnetycznego stanowiącego składową część całego zespołu. Parametry te posłużą do budowy modelu obliczeniowego kompletnego zespołu elektromagnetycznego i opracowania poprawnego modelu cieplnego oraz sposobu chłodzenia maszyn elektrycznych.

Właściwości cieplne obwodu elektromagnetycznego zależą zarówno od właściwości elementów składowych jak i od technologii ich wykonania. Najdokładniejszym sposobem

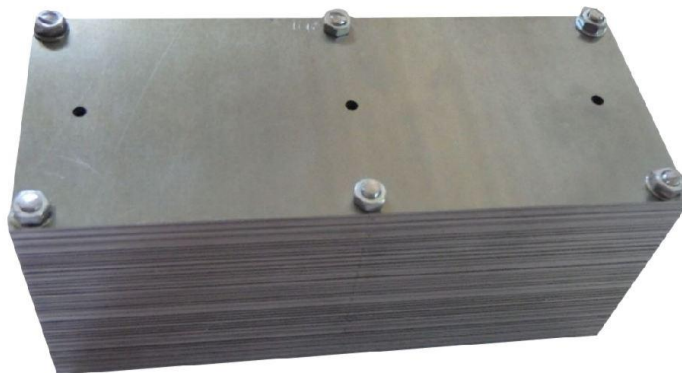
określenia zastępczych właściwości cieplnych elementów układu jest przeprowadzenie badań na próbkach wykonanych z materiałów stosowanych w maszynach elektrycznych zgodnie z technologią stosowaną w danym zakładzie produkcyjnym. Badania takie zostały przedstawione w pracy [3]. Wykonano je na próbkach używając drogich, specjalistycznych stanowisk pomiarowych.

W niniejszej pracy zaproponowano metodę wyznaczania parametrów obliczeniowych obwodu elektromagnetycznego w oparciu o znacznie prostsze doświadczenia. Doświadczenie takie jest możliwe do przeprowadzenia w każdym zakładzie produkcyjnym i nie wymaga zastosowania wysoko wyspecjalizowanych urządzeń pomiarowych.

### **3. Sposób tworzenia modelu obliczeniowego obwodu elektromagnetycznego**

#### **3.1. Dobór i weryfikacja przewodności cieplnej pakietu blach elektrotechnicznych w kierunku poprzecznym**

W celu właściwego doboru właściwości cieplnych obwodu elementarnego przygotowano próbkę w postaci pakietu blach elektrotechnicznych wykonanych z blachy M400-50A (rys. 1). Pakiet ten wykonano z materiału stosowanego powszechnie przy produkcji maszyn elektrycznych. W próbce pakietu przygotowano otwory umożliwiające pomiar temperatury.



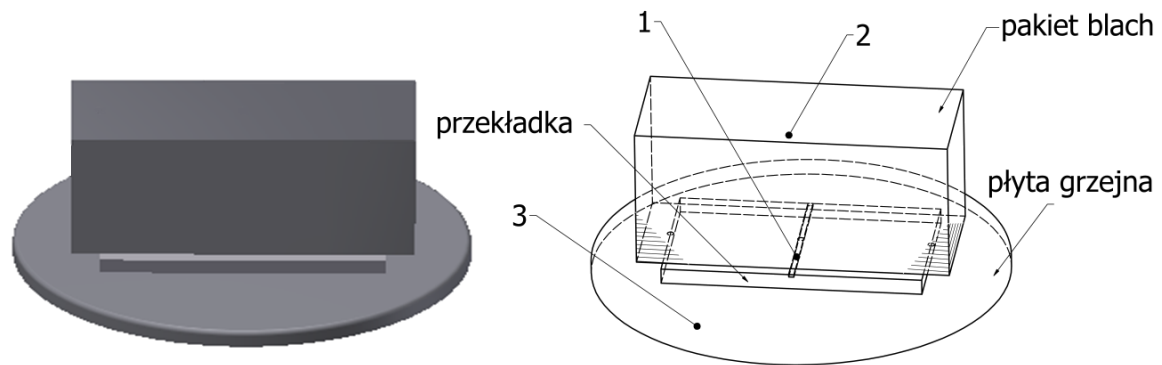
Rys. 1 Próbka pakietu blach elektromagnetycznych

W większości publikacji spotyka się obliczenia oparte na modelach dwuwymiarowych lub schematach cieplnych. W obliczeniach tych często jednak zakłada się jednowymiarowy rozkład temperatury w płaszczyźnie blach. W analizie trójwymiarowej istotnym parametrem jest wartość zastępczej przewodności cieplnej w kierunku prostopadłym do płaszczyzny blach. Wartość tego współczynnika zależy od gatunku blachy, rodzaju zastosowanej izolacji oraz siły użytej podczas pakietowania, co potwierdzają badania przedstawione w pracy [3].

Celem prostego określenia zastępczej przewodności cieplnej pakietu w kierunku poprzecznym przeprowadzono doświadczenie, które następnie zamodelowano i rozwiązano numerycznie. Na podstawie wyników doświadczenia, w cyklicznych symulacjach numerycznych, wyznaczono parametry cieplne modelu obliczeniowego, które mogą zostać użyte do obliczeń cieplnych kompletnej maszyny elektrycznej.

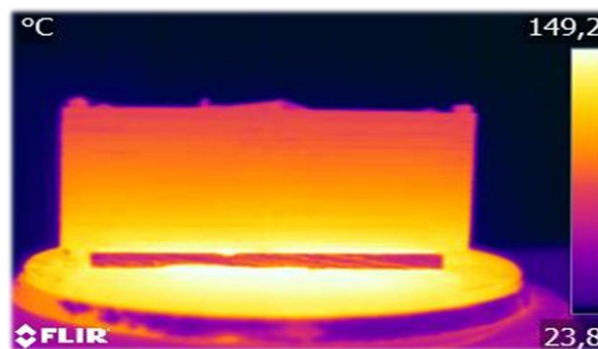
Podczas doświadczenia wykorzystano płytę grzejną o mocy 125W. Po rozgrzaniu płyty do temperatury 160°C umieszczono na niej przygotowaną próbkę pakietu blach. Dla zapewnienia odpowiedniego kontaktu z płytą, próbkę ułożono na przekładce aluminiowej oraz użyto pasty termoprzewodzącej. Podczas doświadczenia monitorowano temperaturę za pomocą czujników temperatury Pt100 w punktach pomiarowych pokazanych na rys. 2, oraz

przy użyciu kamery termowizyjnej wykorzystywanej często do monitorowania stanu technicznego maszyn elektrycznych [9, 11].



Rys. 2 Rozmieszczenie termopar podczas badań: 1-dolna powierzchnia pakietu, 2-górna powierzchnia pakietu, 3-płyta grzejna, 4-temperatura otoczenia.

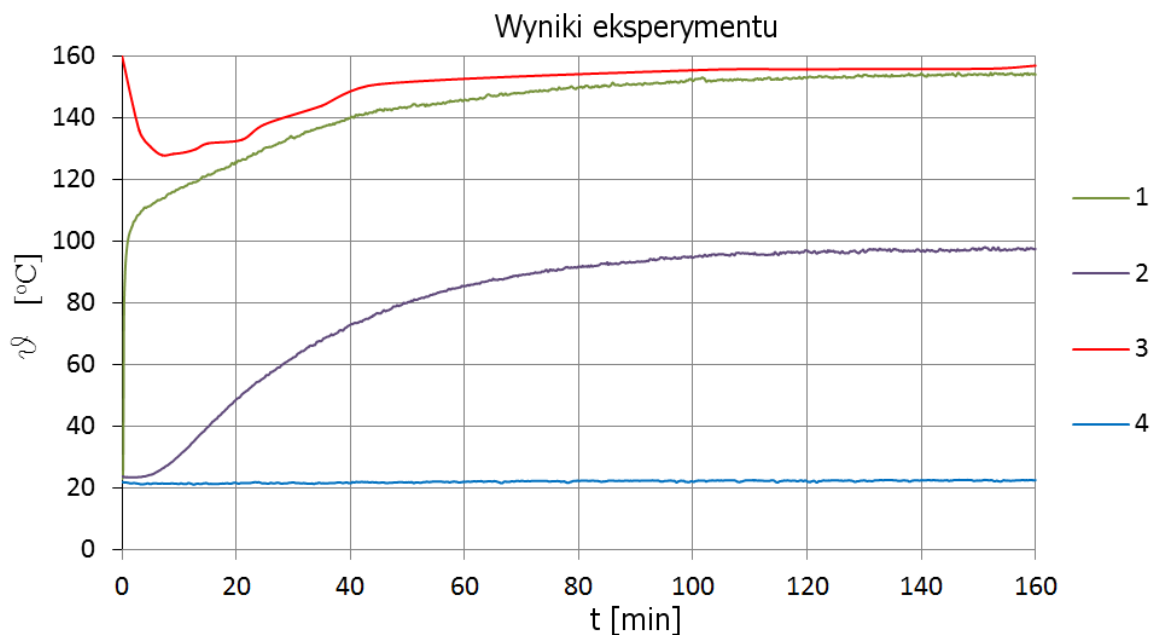
Stanowisko pomiarowe zostało osłonięte tak, aby zapewnić oddawanie ciepła w wyniku konwekcji naturalnej. Rejestrację temperatury prowadzono do momentu osiągnięcia stanu ustalonego. Rys. 3 przedstawia termogram stanu ustalonego.



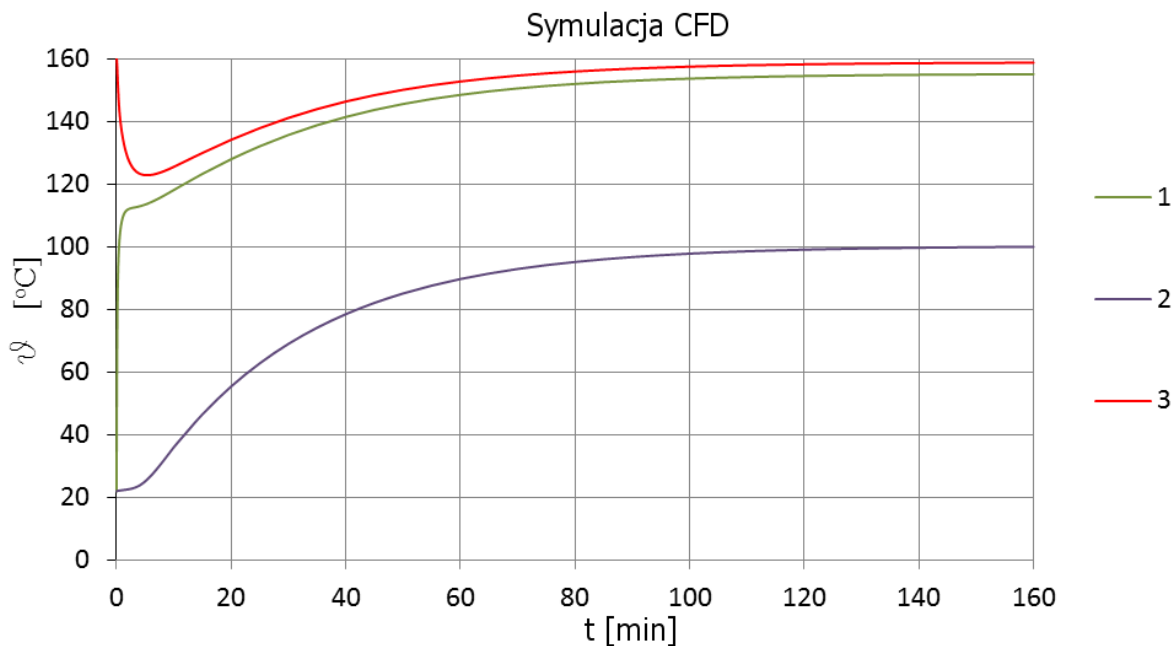
Rys. 3 Termogram stanu ustalonego badań przewodności cieplnej pakietu blach w poprzek blach

Stanowisko doświadczalne zamodelowano następnie w programie Autodesk Inventor (rys. 2) i tak przygotowany model zaimportowano do programu Autodesk Simulation CFD w celu przeprowadzenia symulacji przepływu ciepła. Jako warunki brzegowe przyjęto parametry odpowiadające dokładnie warunkom panującym podczas doświadczenia. Uwzględniono: temperaturę początkową płyty ( $\sim 160^{\circ}\text{C}$ ), moc dostarczaną przez płytę grzejną (125W), temperaturę początkową próbki równą temperaturze otoczenia ( $\sim 21^{\circ}\text{C}$ ), własności przekładki aluminiowej ( $C_p=896\text{J/kgK}$ ,  $\lambda=203\text{W/mK}$ ) oraz pasty termoprzewodzącej ( $C_p=465\text{J/kgK}$ ,  $\lambda=0,78\text{W/mK}$ ). Uwzględniono także zjawisko promieniowania i konwekcji naturalnej. Wartość współczynnika wymiany przyjęto na poziomie  $7\text{ W/m}^2$ .

Dla tak przygotowanego modelu obliczeniowego przeprowadzono szereg symulacji numerycznych typu transient, mających na celu kalibrację modelu. Podczas kalibracji zmieniano wartość parametru przewodności cieplnej pakietu blach w kierunku poprzecznym od 1 do  $5,6\text{W/mK}$ . Wartość ciepła właściwego przyjęto  $490\text{J/kgK}$  zgodnie z [3, 6, 13]. Największą zgodność doświadczenia z symulacjami uzyskano dla  $\lambda_{bz}=3\text{W/mK}$ . Porównanie wyników uzyskanych w wyniku analizy numerycznej z doświadczeniem pokazano na rys. 4 i 5.



Rys. 4 Rozkład temperatury w czasie w punktach pomiarowych 1-4 uzyskany z pomiarów laboratoryjnych



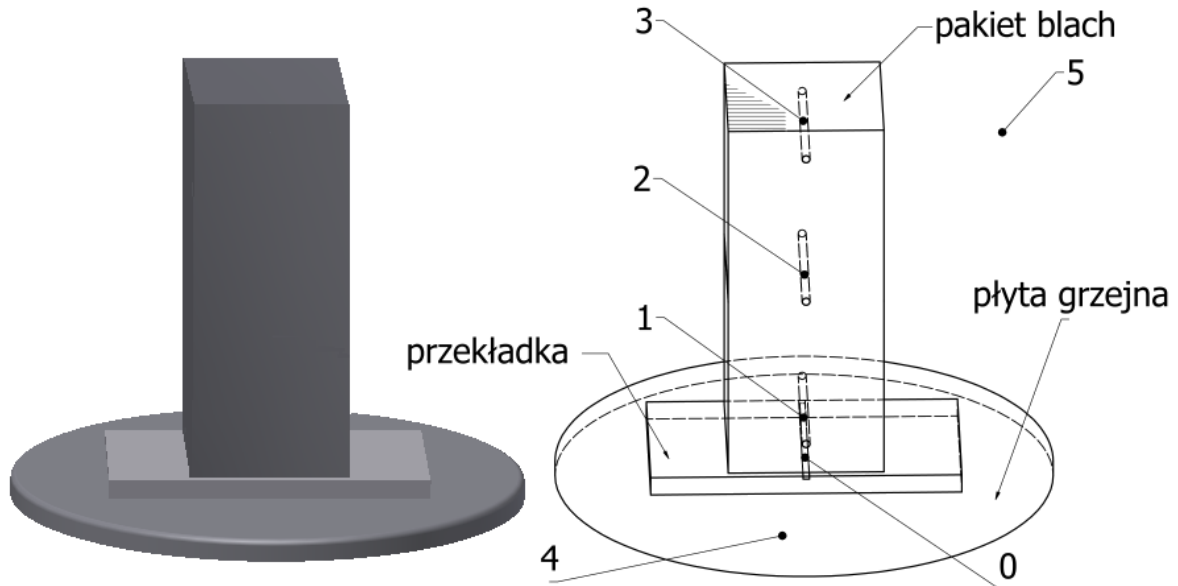
Rys. 5 Rozkład temperatury w czasie w punktach pomiarowych 1-3 otrzymany z analizy numerycznej

Porównując wykresy na rys. 4 i 5 widać zbieżność wyników symulacji numerycznych z doświadczeniem. Potwierdza to poprawność przyjętego modelu obliczeniowego, wartości parametrów materiałowych oraz metody kalibracji modelu.

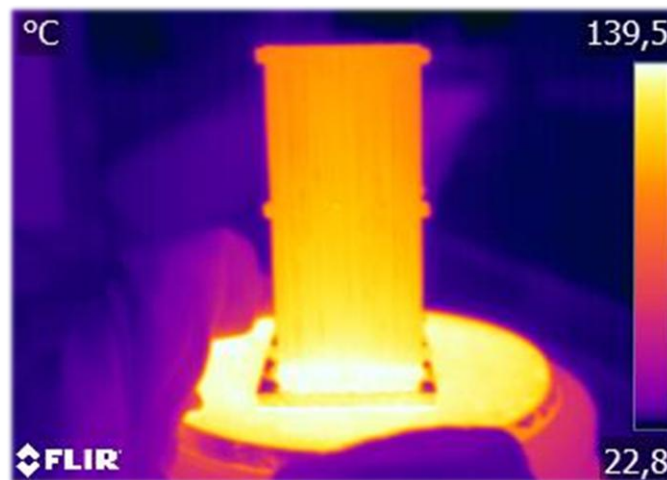
### 3.2. Dobór i weryfikacja przewodności cieplnej pakietu blach elektrotechnicznych w kierunku podłużnym

W celu określenia zastępczej przewodności cieplnej pakietu blach elektrotechnicznych w kierunku podłużnym, przeprowadzono doświadczenie podobne do

opisanego w punkcie 3.1, które następnie zamodelowano i rozwiązano numerycznie. Sposób i procedura przeprowadzenia doświadczenia były identyczne, jak w przypadku badania przewodności cieplnej w kierunku prostopadłym do kierunku pakietowania. Podczas doświadczenia za pomocą czujników Pt100 monitorowano temperaturę w punktach pomiarowych rozmieszczonych zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 6. Rys. 7 przedstawia termogram stanu ustalonego.

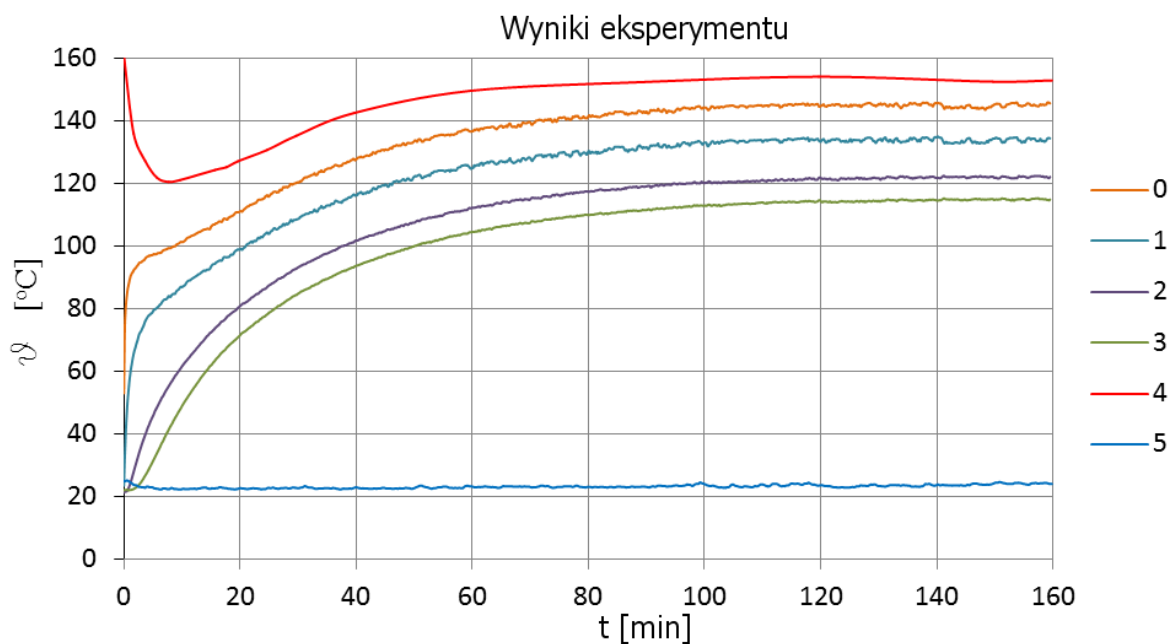


Rys. 6 Rozmieszczenie termopar podczas badań: 0-górna powierzchnia przekładki pod pakietem blach, 1,2,3-wewnątrz pakietu w wykonanych otworach, 4-płyta grzejna, 5-temperatura otoczenia

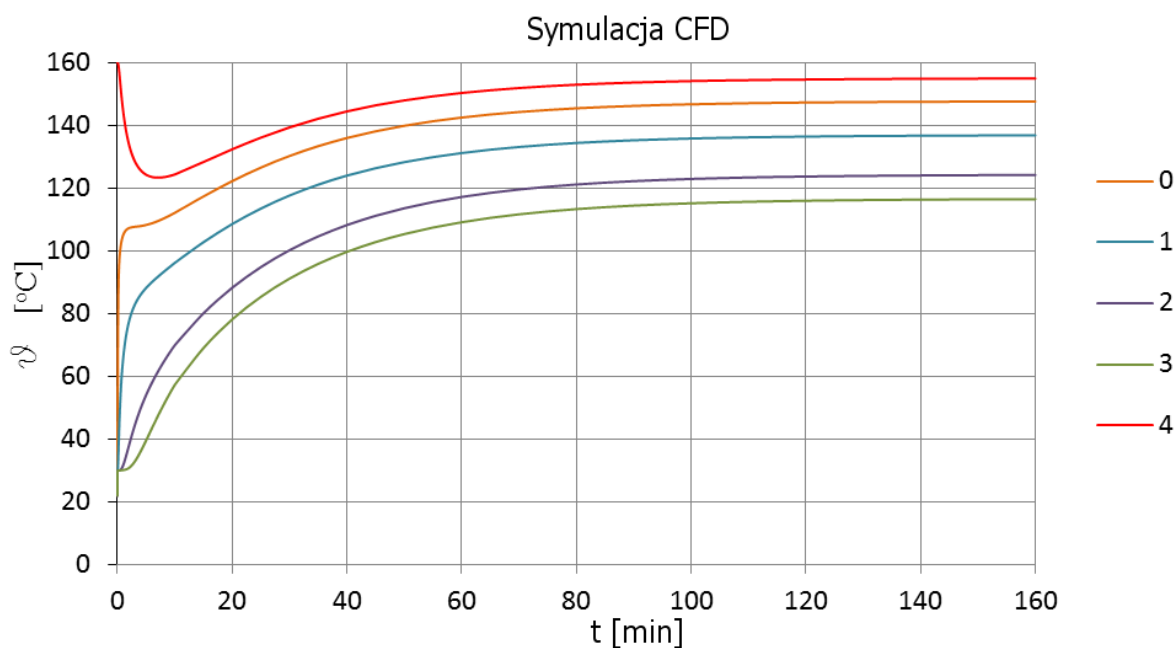


Rys. 7 Termogram stanu ustalonego

W symulacjach numerycznych zmieniano parametr zastępczej przewodności cieplnej pakietu blach  $\lambda_{b_{x,y}}$  w zakresie od 20 do 30W/mK. Ciepło właściwe przyjęto jak poprzednio na poziomie  $C_{pb}=490\text{J/kgK}$ . W wyniku przeprowadzonej kalibracji modelu największą zgodność wyników z doświadczeniem uzyskano dla  $\lambda_{b_z}=30\text{W/mK}$ , co można zaobserwować porównując rozkłady temperatury zilustrowane na rys. 8 i rys. 9.



Rys. 8 Rozkład temperatury w czasie w punktach pomiarowych 0-5 uzyskany z pomiarów laboratoryjnych



Rys. 9 Rozkład temperatury w czasie w punktach pomiarowych 0-4 otrzymany z analizy numerycznej

### 3.3. Weryfikacja poprawności wyznaczania zastępczej rezystancji cieplnej izolacji żłobkowej oraz zastępczych parametrów modelu uzwojenia

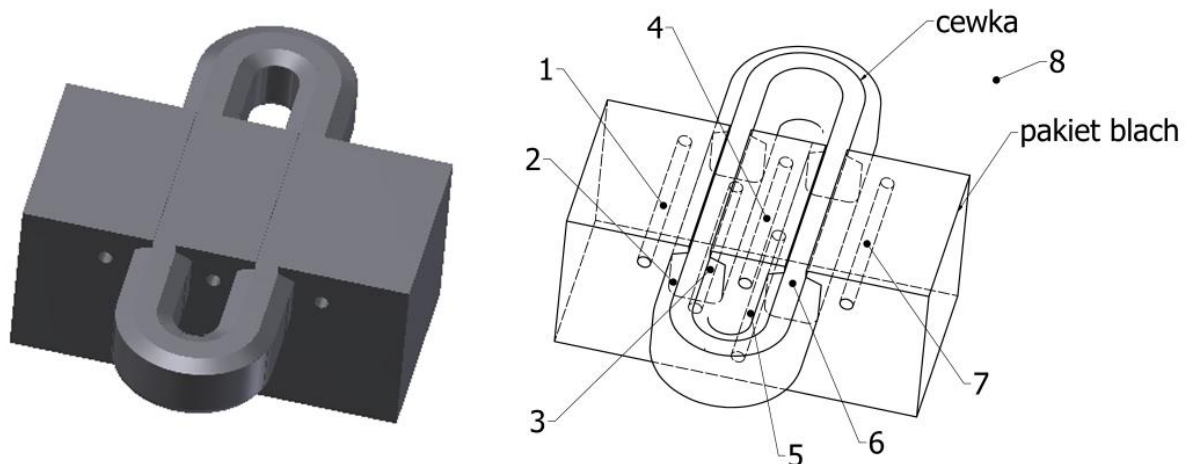
W celu wyznaczenia zastępczej rezystancji cieplnej izolacji żłobkowej oraz zastępczych parametrów modelu uzwojenia obwodu elektromagnetycznego przedstawionego na rys. 10, podobnie jak dla pakietu blach, przeprowadzono doświadczenie, które następnie zamodelowano i rozwiązano numerycznie.



Rys. 10 Próbka obwodu elektromagnetycznego

Próbka obwodu elektromagnetycznego została przygotowana zgodnie ze stosowaną najczęściej technologią wykonywania stojanów uzwojonych. Wycinek pakietu blach wykonano z blach elektrotechnicznych wyciętych laserowo. Cewkę uzwojenia wykonano z drutu okrągłego  $\varnothing 0,71\text{mm}$ . Jako izolację żłobkową zastosowano, elastyczny laminat Nen o grubości  $0,23\text{mm}$ . Próbkę poddano następnie impregnacji zanurzeniowej.

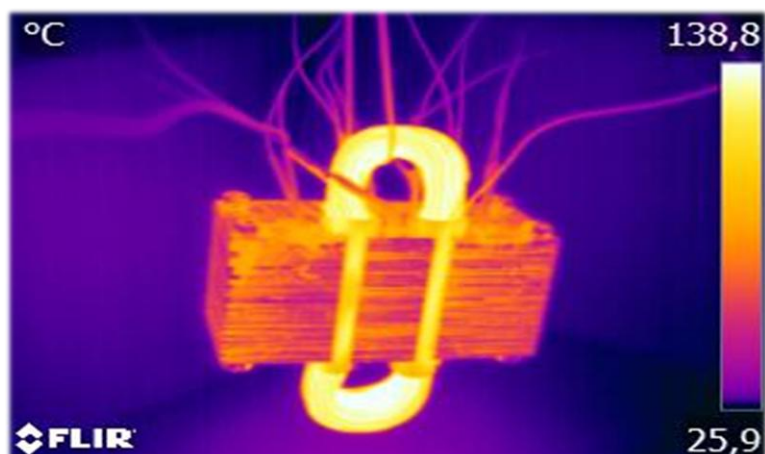
Podczas doświadczenia uzwojenie cewki przygotowanej próbki obwodu elektromagnetycznego zasilono prądem stałym tak, aby generowało moc  $20\text{W}$ , monitorując za pomocą czujników Pt100 temperaturę w punktach pomiarowych rozmieszczonych zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 11.



Rys. 11 Rozmieszczenie termopar podczas badań: 1,3,4,5,7- we wnętrzu jarzma w przygotowanych otworach, 2-na dnie żłobka pod izolacją żłobkową, 6- w uzwojeniu, 8-temperatura otoczenia

Stanowisko pomiarowe zostało osłonięte tak, aby zapewnić oddawanie ciepła w wyniku konwekcji naturalnej. Badanie przeprowadzono do osiągnięcia stanu ustalonego. Termogram stanu ustalonego przedstawiono na rys. 12.





Rys. 12 Termogram dla próbki obwodu elektromagnetycznego

Jako warunki brzegowe do przeprowadzenia symulacji numerycznej przyjęto parametry odpowiadające dokładnie warunkom panującym w czasie prowadzenia badań. Uwzględniono temperaturę początkową próbki równą temperaturze otoczenia ( $\sim 21^{\circ}\text{C}$ ), moc dostarczaną przez cewkę zasilaną prądem stałym ( $\sim 20\text{W}$ ), oraz własności materiałowe pakietu blach wyznaczone w sposób opisany wyżej. Przy oddawaniu ciepła do otoczenia, tak samo jak w pkt.3.1 i 3.2 uwzględniono zjawisko promieniowania i konwekcji naturalnej.

Kluczowym etapem budowy modelu numerycznego było opracowanie modelu uzwojenia i izolacji żłobkowej. Uzwojenie zamodelowano jako monolit. Zamodelowanie izolacji żłobkowej wiązałoby się bowiem z utworzeniem struktury cienkościennej, która podczas tworzenia siatki elementów skończonych wymagałaby znacznego zagęszczenia siatki i powodowałaby wydłużenie czasu obliczeniowego. W przypadku analizy modelu przestrzennego całej maszyny fakt ten skutecznie uniemożliwiłoby przeprowadzenie efektywnych obliczeń. Ponadto istnieje trudność w określeniu wpływu przylegania izolacji do pakietu blach i drutu, a także wpływu zastosowanej impregnacji i szczelin wypełnionych powietrzem na ostateczne wartości parametrów cieplnych takiej izolacji. Dlatego w modelu obliczeniowym pominięto bryłowy model izolacji żłobkowej i wprowadzono zastępczy parametr kontaktowej rezystancji cieplnej izolacji żłobkowej  $R_{c_z}$ , wyliczony na podstawie znanej mocy przepływającej przez powierzchnię izolacji i spadku temperatury otrzymanego w stanie ustalonym [14, 16]. Taka metoda wyznaczania zastępczej wartości cieplnej izolacji żłobkowej jest, co prawda powszechnie wykorzystywana do określania parametrów cieplnych modeli obliczeniowych, dotyczy jednakże kompletnych obwodów elektromagnetycznych maszyn [5, 6], a nie jak w niniejszej pracy reprezentatywnej próbki.

(1)

W modelu obliczeniowym przyjęto następujące własności cieplne:

- Dla pakietu blach
  - $C_{p_b} = 490 \text{ J/kgK}$ ,
  - $\lambda_{b_z} = 3 \text{ W/mK}$ ,
  - $\lambda_{b_{xy}} = 30 \text{ W/mK}$ .
- Dla uzwojenia
  - $C_{p_u} = 380 \text{ J/kgK}$ ,
  - $\lambda_{u_{xy}} = 190 \text{ W/mK}$ ,
  - $\lambda_{u_z} = 0,45 \text{ W/mK}$ ,

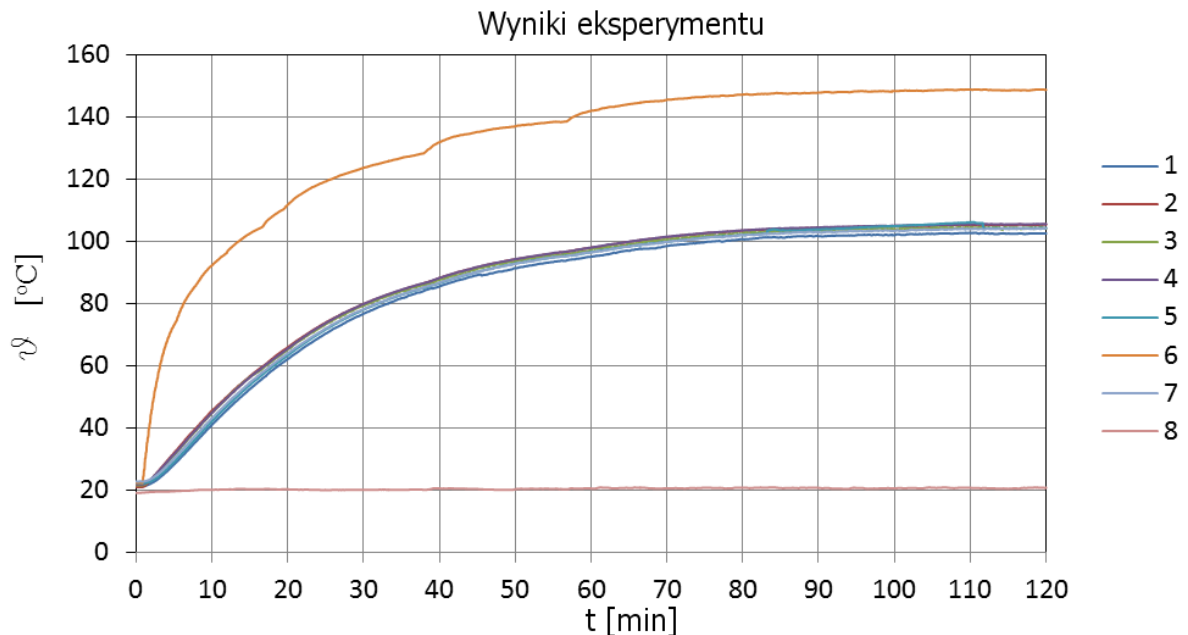
$$R_{c_z} = 0,0073 \text{ Km}^2/\text{W}.$$

Zastępczą przewodność cewki w kierunku prostopadłym do nawijania określono natomiast na podstawie wzoru podanego przez Richtera obowiązującego dla cewki z przewodów okrągłych ściśle nawiniętych i przylegających do siebie przy założeniu, że wszystkie wolne przestrzenie zostały wypełnione lakierem.

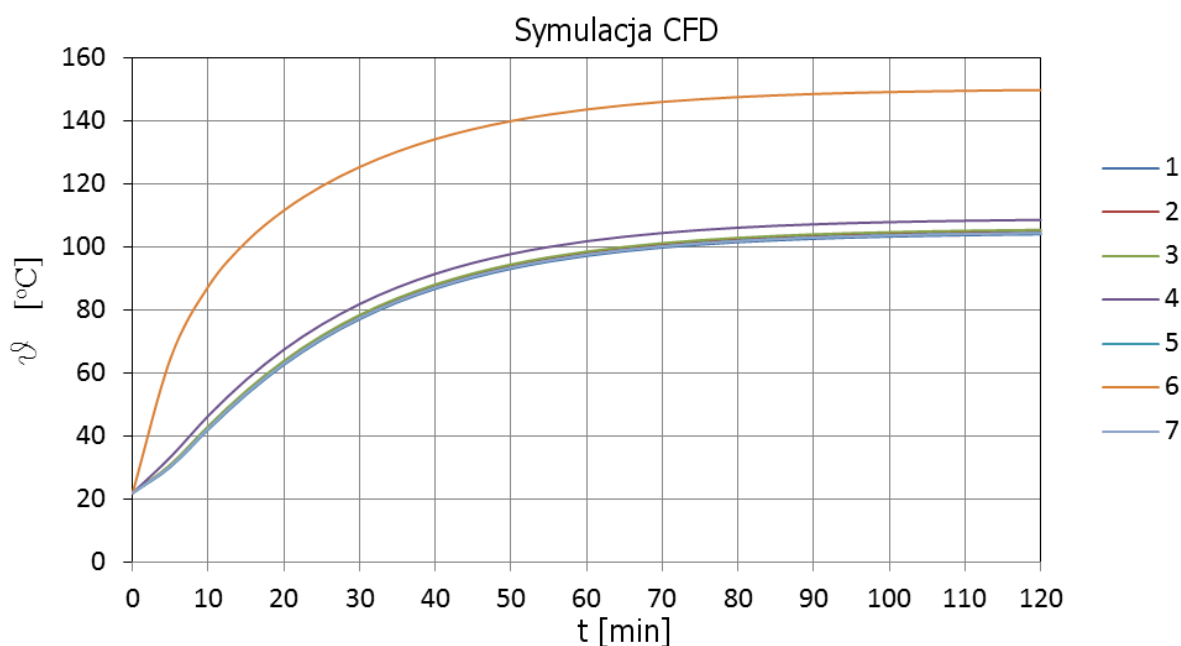
$$\lambda_{u_z} = c \lambda \quad (2)$$

Gdzie współczynnik  $c$  zależy od stosunku średnicy drutu bez izolacji  $d$  do średnicy drutu izolowanego  $d'$ . Dla zastosowanego w uzwojeniu próbki drutu o średnicach  $d=0,71$  oraz  $d'=0,789$  współczynnik ten przyjmuje wartość  $c=4,5$ . Przy założonej przewodności cieplnej izolacji drutu  $\lambda_i = 0,1 \text{ W/mK}$  zastępcza przewodność cieplna uzwojenia w kierunku prostopadłym do nawijania cewek  $\lambda_{u_z}$  przyjmuje wartość  $0,45 \text{ W/mK}$ .

Rozkład temperatury w czasie uzyskany w trakcie badań pokazano na rys. 13 a otrzymany w wyniku symulacji numerycznej na rys. 14.



Rys. 13 Pomierzony rozkład temperatury w próbce obwodu elektromagnetycznego



Rys. 14 Obliczony rozkład temperatury w próbce obwodu elektromagnetycznego

Porównując otrzymane wykresy widać zbieżność wyników symulacji numerycznych z doświadczeniem. Potwierdza to poprawność przyjętego modelu obliczeniowego oraz metody wyznaczania zastępczych wartości parametrów materiałowych. Tak skalibrowany model obwodu magnetycznego, może być w dalszym etapie wykorzystany do budowy pełnego modelu całej maszyny elektrycznej.

#### 4. Podsumowanie

Oprogramowanie do modelowania przestrzennego pozwala już na etapie projektowania uzyskać wirtualne modele maszyn. Modele te są następnie wykorzystywane do obliczeń wytrzymałościowych i przepływowych w oparciu o metodę elementów skończonych, jednak w analizie maszyn elektrycznych niezbędne jest przyjęcie odpowiedniej strategii dotyczącej budowy modelu obliczeniowego polegającego na zastosowaniu odpowiednich uproszczeń i wprowadzenia właściwych wartości parametrów obliczeniowych.

W niniejszej pracy zwrócono uwagę na możliwość zbudowania właściwego modelu obliczeniowego najbardziej skomplikowanej struktury maszyny elektrycznej, jaką jest obwód elektromagnetyczny. Modelowanie pakietu blach elektrotechnicznych, jako bryły o przewodności cieplnej określonej w wyniku kalibracji, przeprowadzonej w oparciu o wyniki eksperymentu, oraz monolityczny model cewki i zastąpienie izolacji żłobkowej parametrem zastępczej rezystancji kontaktowej wyznaczonej doświadczalnie, pozwoliły na opracowanie efektywnego modelu obliczeniowego obwodu elektromagnetycznego. Porównując rozkłady temperatur zarejestrowane podczas doświadczeń (rys. 8 i 13) i otrzymanych z obliczeń numerycznych (rys. 9 i 14), przy przyjęciu parametrów uzyskanych w wyniku kalibracji potwierdzają, że przyjęta metoda budowy i wzorcowania modelu jest poprawna. Zaproponowany przestrzenny, uproszczony model obwodu elektromagnetycznego i metoda jego kalibracji służyć mogą do opracowania modelu obliczeniowego kompletnej maszyny elektrycznej, który pozwoli na efektywne projektowanie, z wykorzystaniem metody elementów skończonych, maszyn elektrycznych o większej niezawodności.

W pracach o podobnej tematyce można znaleźć również opisane różne sposoby modelowania i kalibracji modeli obliczeniowych oraz problemy z tym związane. W

większości dotyczą one jednak możliwości ich wykorzystania w obliczeniach opartych na schematach cieplnych [1, 4-8, 10, 12, 13, 15].

## Literatura

1. Almandoz G, Poza J, Ugalde G, SanAndres U. Design of Cooling Systems Using Computational Fluid Dynamics and Analytical Thermal Models. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2014; 8(61): 4383–4391.
2. Będkowski B, Madej J. The potential of 3D FEM and CFD methods for cooling systems analysis of electrical machines – the premises. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne - Electrical Machines – Transaction Journal* 2012; 1(94): 139-143.
3. Bennion K. Presentation: Electric Motor Thermal Management. Washington: National Renewable Energy Laboratory, 2012.
4. Boglietti A, Cavagnino A, Lazzari M, Pastorelli M. A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2003; 4(39): 945–952.
5. Boglietti A, Cavagnino A, Staton D. Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2005; 3(20): 620–628.
6. Boglietti A, Mejuto C, Mueller M, Shanel M, Staton D. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2009; 3(56): 871-882.
7. Coia Y, Colli V D, Marignetti F. Design of axial flux PM synchronous machines through 3-D coupled electromagnetic thermal and fluid-dynamical finite-element analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2008; 10(55): 3591–3601.
8. Cheng M, Sun X. Thermal analysis and cooling system design of dual mechanical port machine for wind power application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2013; 5(60): 1724–1733.
9. Głowacz A, Głowacz A, Głowacz Z. Recognition of monochrome thermal images of synchronous motor with the application of quadtree decomposition and backpropagation neural network. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16(1): 92–96.
10. Hendershot J R, Miller T J E. Design of brushless permanent-magnet motors. Oxford: Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1994.
11. Kuchynkova H, Hajek V. Measurement of temperature of electrical Machines using thermovision camera. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne - Electrical Machines – Transaction Journal* 2010; 87: 139-134.

12. Leksell M, Nategh S, Wallmark O, Zhao S. Thermal Analysis of a PMSRM Using Partial FEA and Lumped Parameter Modeling. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2012; 2(27): 477-488.
13. Mebarki A, Mejuto C, Mueller M, Shanel M, Staton D. Thermal modelling investigation of heat paths due to iron losses in synchronous machines. *Proc. 4th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives* 2008: 225–229.
14. Ozisik, M N. *Heat Transfer - A Basic Approach*. New York: McGraw Hill, 1985.
15. Staton D A. Thermal computer aided design - Advancing the revolution in compact motors. *Proc. International Electric Machines and Drives Conference* 2001: 858–863.
16. Thomas L C. *Heat Transfer – Professional Version, 2nd Edition*. Tulsa, Oklahoma: Capstone Publishing Company, 1999.