

**Bartłomiej Będkowski, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice**  
**Jerzy Madej, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała**

## **WŁASNOŚCI CIEPLNE PAKIETU BLACH ELEKTROTECHNICZNYCH – BADANIA I SYMULACJE**

### **THERMAL PROPERTIES OF SILICON STEEL CORE - RESEARCH AND SIMULATIONS**

**Streszczenie:** W analizach elektromagnetycznych, mechanicznych czy termicznych niezbędna jest znajomość własności materiałowych badanego elementu. Analiza termiczna maszyn elektrycznych wymaga znajomości własności cieplnych poszczególnych elementów wchodzących w skład urządzenia. Wartość parametrów cieplnych dla materiałów, z których wykonana jest większość części maszyn elektrycznych jest ogólnie dostępna. Jednakże zdarzają się wyjątki, których przykładem jest pakiet blach elektrotechnicznych. Producenci blach rzadko udostępniają wartość przewodności cieplnej. Dodatkowo parametr ten przyjmuje inną wartość dla jednej blachy, a inną dla pakietu blach elektrotechnicznych. Ponadto przewodność cieplna jest inna w kierunku podłużnym, a inna w kierunku poprzecznym pakietu. Zależy ona od takich czynników jak rodzaj izolacji pomiędzy blachami, czy siły użytej podczas pakietowania. W artykule przedstawiono proste doświadczenie, które wspomagane programem do obliczeń termicznych, pozwala na wyznaczenie parametrów przewodności cieplnych pakietu blach elektrotechnicznych. Doświadczenie polega na jednostronnym ogrzewaniu próbki w postaci pakietu blach i monitorowaniu rozkładu temperatury. Modelując to doświadczenie w programie do analiz termicznych i kalibrując model obliczeniowy wynikami eksperymentu wyznaczano wartość przewodności cieplnej pakietu blach w dwóch prostopadłych kierunkach.

**Abstract:** During the electromagnetic, mechanical and thermal analysis the material properties of analyzed element are necessary to know. Moreover, during the thermal analysis of electrical machines, the knowledge of the thermal properties of their individual components is required. Thermal properties of most electrical machines parts are readily available. However, there are exceptions, an example may be a silicon steel core. Electrical sheets' manufacturers rarely provide thermal conductivity values. Additionally, this property has a different value when you consider a silicon steel core. In this case this value is different along and across the lamination stack. It depends on many factors such as the type of insulation and the lamination stack pressure. The simple experiment together with the program for the thermal calculation which allows to determine the thermal conductivity parameters of laminations stack are presented in this article. The experiment is based on monitoring the temperature of heated sample of lamination stack. In the next step experiment was modeled in the program which allows for thermal analysis. As a result of the calibration of the calculation model the thermal conductivity, along and across the lamination of the laminations stack, was determined.

**Słowa kluczowe:** MES, przewodność cieplna, pakiet blach elektrotechnicznych, analiza numeryczna  
**Keywords:** FEM, thermal conductivity, lamination stack, numerical analysis

#### **1. Wstęp**

Stan cieplny maszyn elektrycznych wirujących jest bardzo istotny. Ma on wpływ na wiele czynników związanych z ich funkcjonowaniem i użytkowaniem. Wysoka temperatura wpływa na sprawność, bezawaryjny czas pracy, bezpieczeństwo użytkownika i wiele innych czynników eksploatacyjnych. Z tego powodu na całym świecie obliczeniami cieplnymi maszyn elektrycznych zajmuje się wiele ośrodków naukowych i przemysłowych. Dostępna literatura obejmuje zagadnienia z zakresu metod obliczeniowych, wyznaczania własności materiałowych oraz wpływu rozwiązań konstrukcyjnych i technologii wykonania na stan termiczny róż-

nego rodzaju maszyn elektrycznych [1-3,5,7,8,10].

Niezależnie od stosowanych metod obliczeniowych, parametrem wejściowym są dane materiałowe. Większość elementów składowych silników elektrycznych wykonana jest z typowych materiałów konstrukcyjnych, których własności cieplne są znane. Problem stanowi natomiast rdzeń stojana, czy wirnika, który składa się z pakietu blach elektrotechnicznych. Producenci rzadko podają własności przewodności cieplnej blach elektrotechnicznych, a jeśli nawet, to dotyczą one parametru opisującego przewodność cieplną w płaszczyźnie blachy. Kiedy

weźmiemy pod uwagę pakiet blach to zauważymy, że ma on budowę kompozytową, bowiem w kierunku poprzecznym występują naprzemiennie z warstwami blachy warstwy izolacji. Dodatkowo między warstwami izolacji występuje zjawisko rezystancji cieplnej, której wartość zależy od technologii wykonania pakietu. Występuje zatem wiele czynników które mają wpływ na wartość przewodności cieplnej pakietu w kierunku poprzecznym i podłużnym. Obszerne badania na ten temat przedstawiono w pracy [2]. Badania te przeprowadzono jednak na wysoko wyspecjalizowanym sprzęcie i dla ograniczonej ilości próbek. W niniejszym artykule przedstawiono uproszczoną metodę wyznaczania przewodności cieplnej pakietu blach elektrotechnicznych.

## 2. Przebieg doświadczenia

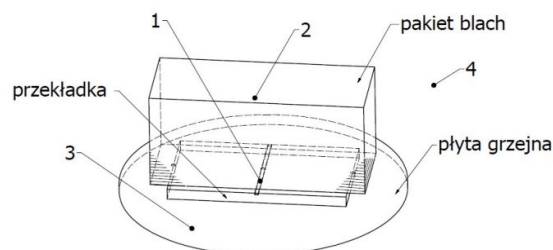
W celu wyznaczenia przewodności cieplnej pakietu blach elektrotechnicznych wykonano prosty eksperyment. Próbkę rdzenia złożonego z blachy elektrotechnicznej M400-50A wykonaną zgodnie z technologią zakładu produkcyjnego, ogrzewano kolejno w dwóch płaszczyznach wzdłuż i w poprzek blach w zależności od badanego kierunku przewodności cieplnej. Próbkę umieszczono na płycie grzejnej na przekładce aluminiowej, a rezystancję termiczną w miejscach styku ograniczono przez zastosowanie pasty termoprzewodzącej (rys.1).



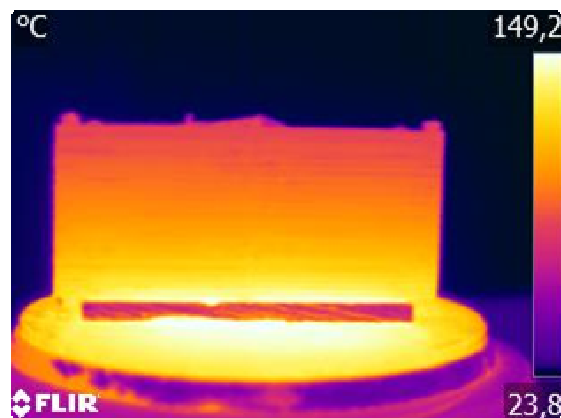
Rys. 1. Próbkę pakietu blach na płycie grzejnej

W celu zapewnienia wymiany ciepła z otoczeniem poprzez radiację i konwekcję, próbka wraz z płytą grzejną została osłonięta.

Próbkę o temperaturze otoczenia umieszczono na rozgrzanej płycie grzejnej zasilanej stałą mocą i za pomocą czujników Pt100 w punktach pomiarowych rozmieszczonych zgodnie z rys. 2 oraz za pomocą kamery termowizyjnej (rys.3) monitorowano jej temperaturę [4,6,9].

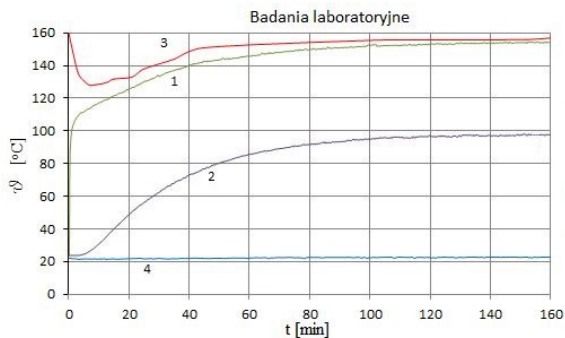


Rys. 2. Rozmieszczenie termopar podczas wyznaczania przewodności cieplnej pakietu w poprzek blach: 1-dolna powierzchnia pakietu, 2-górna powierzchnia pakietu, 3-temperatura płyty grzejnej, 4- temperatura otoczenia



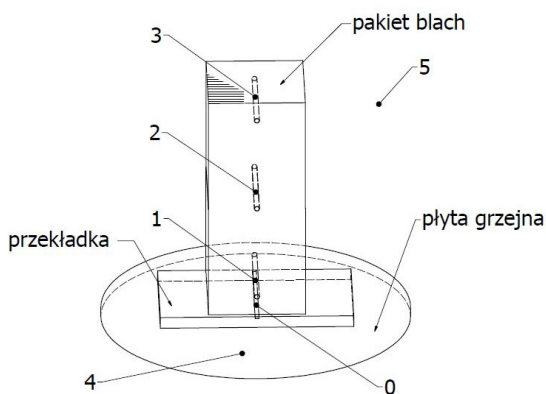
Rys. 3. Termogram zarejestrowany podczas wyznaczania przewodności cieplnej pakietu w poprzek blach

Na rys.4 przedstawiono pomiar temperatury zarejestrowany w czasie doświadczenia. Podczas próby monitorowano temperaturę otoczenia (4), temperaturę płyty grzejnej (3), temperaturę dolnej powierzchni pakietu blach (1) oraz górnej części pakietu. Doświadczenie przerwano po ustabilizowaniu się temperatury mierzonej w punktach pomiarowych. Jest to jednoznaczne z osiągnięciem przez próbkę stanu ustalonego. Na rys. 4 przedstawiono wykres rozkładu temperatury w punktach pomiarowych w czasie trwania eksperymentu.

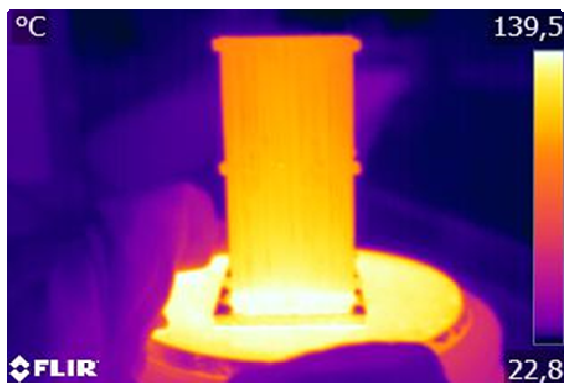


Rys. 4. Temperatura zarejestrowana podczas wyznaczania przewodności cieplnej pakietu w poprzek blach

Podobną próbę przeprowadzono dla analizy przewodności cieplnej wzdłuż pakietu blach. Punkty pomiaru temperatury rozmieszczono zgodnie ze schematem na rys. 5. Temperaturę monitorowano również za pomocą kamery termowizyjnej (rys. 6) [4,6,9].

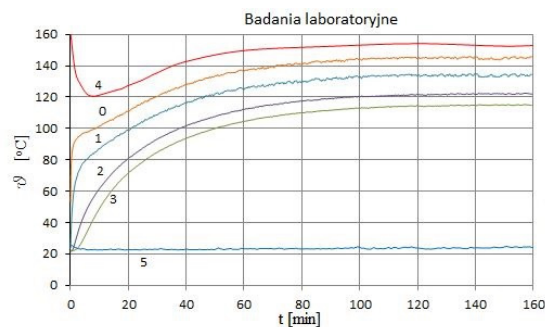


Rys. 5. Rozmieszczenie termopar podczas wyznaczania przewodności cieplnej pakietu wzdłuż blach: 0-górna powierzchnia przekładki pod pakietem blach, 1,2,3-wewnątrz pakietu w wykonanych otworach, 4-płyta grzejna, 5-temperatura otoczenia



Rys. 6. Termogram zarejestrowany podczas wyznaczania przewodności cieplnej pakietu wzdłuż blach

Na rys.7 przedstawiono pomiar temperatury rejestrowany do czasu osiągnięcia stanu ustalonego przez próbkę. Podczas próby rejestrowano temperaturę otoczenia (5), temperaturę płyty grzejnej (4), temperaturę w dolnej części pakietu blach (0), temperaturę wewnątrz pakietu w specjalnie przygotowanych otworach (1- w dolnej części, 2- w środkowej części, 3-w górnej części).

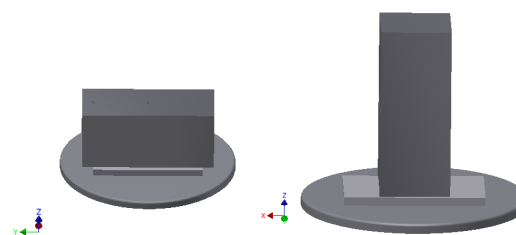


Rys. 7. Temperatura zarejestrowana podczas wyznaczania przewodności cieplnej pakietu wzdłuż blach

Wartości temperatury zarejestrowane podczas eksperymentu posłużyły do kalibracji modelu obliczeniowego.

### 3. Symulacje numeryczne

W celu przygotowania modelu obliczeniowego opartego na metodzie elementów skończonych stworzono, w programie do projektowania przestrzennego Autodesk Inventor, bryłowe modele stanowiska doświadczalnego, (rys. 8).

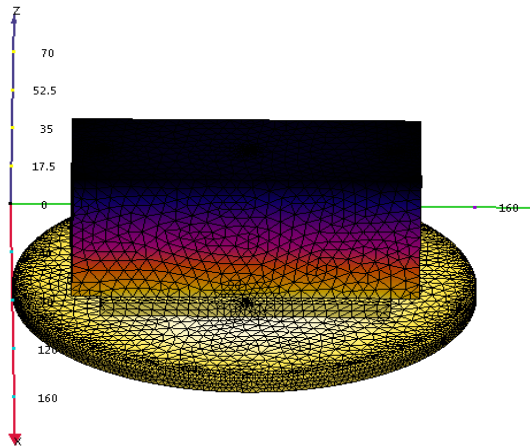


Rys. 8. Modele przestrzenne stanowiska doświadczalnego przygotowane w programie Autodesk Inventor

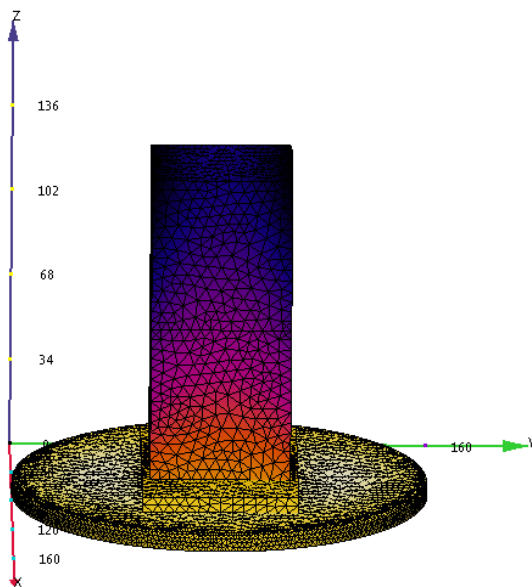
#### 3.1. Model obliczeniowy

Przygotowane modele geometryczne, w celu przeprowadzenia symulacji przepływu ciepła, zaimportowano do programu Autodesk Simulation CFD. Jako warunki brzegowe przyjęto parametry odpowiadające warunkom panującym podczas eksperymentu. Uwzględniono: temperaturę początkową płyty (~160°C), moc dostarczaną przez płytę grzejną (125W), tempe-

raturę początkową próbki równą temperaturze otoczenia ( $\sim 21^{\circ}\text{C}$ ), własności przekładki aluminiowej ( $C_p=896\text{J/kgK}$ ,  $l=203\text{W/mK}$ ) i pasty termoprzewodzącej ( $C_p=465\text{J/kgK}$ ,  $l=0,78\text{W/mK}$ ). Uwzględniono także zjawisko promieniowania i konwekcji naturalnej, określając wartość współczynnika wymiany na poziomie  $7\text{ W/m}^2$ .



Rys. 9. Model dyskretny stanowiska doświadczalnego przewodności cieplnej pakietu w poprzek blach



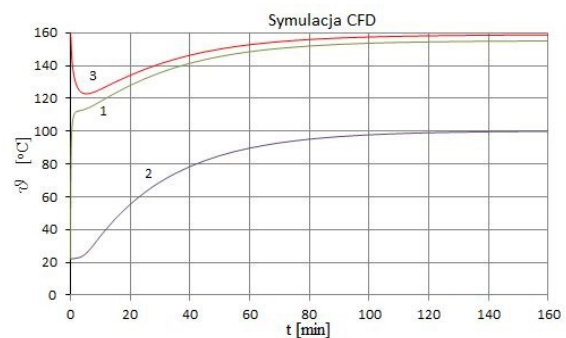
Rys. 10. Model dyskretny stanowiska doświadczalnego przewodności cieplnej pakietu wzdłuż blach

Po przyjęciu wartości materiałowych i warunków brzegowych zbudowano siatkę elementów skończonych. Modele dyskretne stanowiska doświadczalnego do analizy przewodności ciepl-

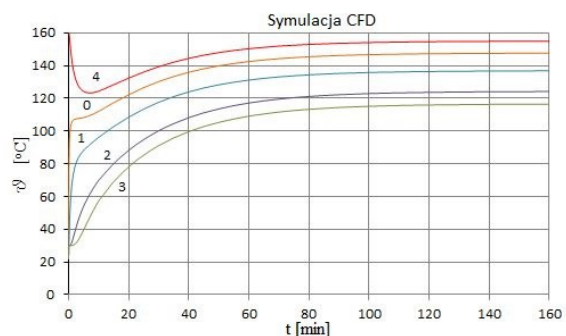
nej w kierunku poprzecznym i podłużnym przedstawiono na rys. 9 i 10.

### 3.2. Wyniki kalibracji

Na przygotowanych modelach obliczeniowych przeprowadzono szereg symulacji numerycznych typu transient, mających na celu kalibrację modelu. Podczas symulacji zmieniano wartość parametru przewodności cieplnej pakietu blach w kierunku poprzecznym od 1 do  $5,6\text{W/mK}$  oraz w płaszczyźnie blach  $\lambda_{b_{x,y}}$  w zakresie od 20 do  $30\text{W/mK}$ . Wartość ciepła właściwego przyjęto na poziomie  $490\text{J/kgK}$  zgodnie z [2, 3,5,7,8]. W wyniku przeprowadzonych symulacji największą zgodność wyników z doświadczeniem uzyskano dla  $1b_z=3\text{W/mK}$  oraz  $\lambda_{b_{x,y}}=30\text{W/mK}$ .

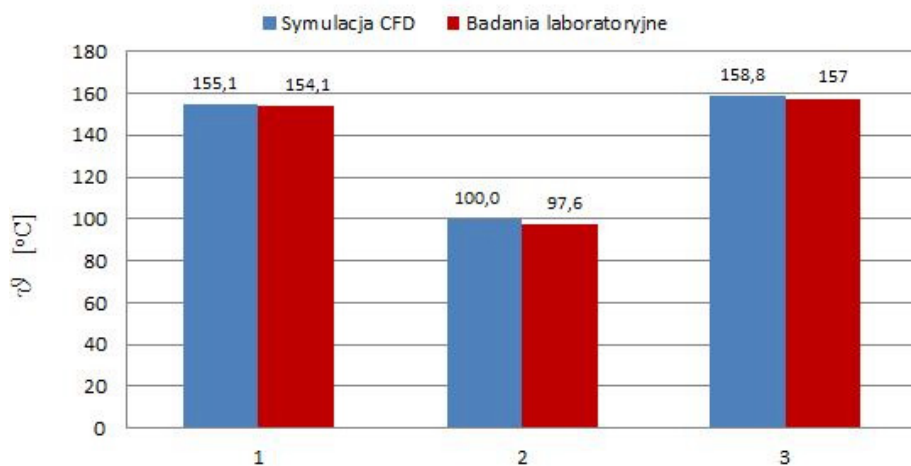


Rys. 11. Temperatura obliczona podczas symulacji numerycznej odzwierciedlającej badanie przewodności cieplnej pakietu w poprzek blach

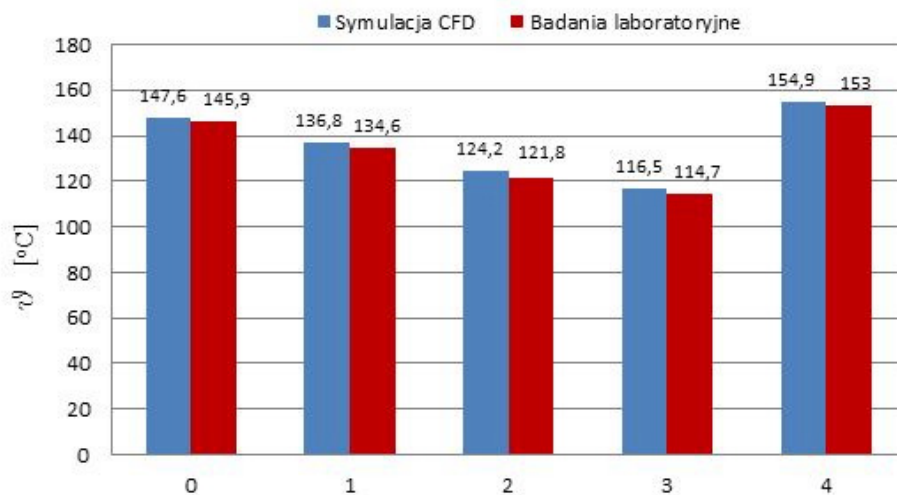


Rys. 12. Temperatura obliczona podczas symulacji numerycznej odzwierciedlającej badanie przewodności cieplnej pakietu wzdłuż blach

Na rys. 11 i 12 pokazano obliczoną temperaturę, w punktach odpowiadającym punktom pomiarowym, uzyskaną dla wymienionych parametrów materiałowych.



Rys. 13. Obliczona i zmierzona temperatura po 160 min w pkt. pomiarowych 1-3 (wynik kalibracji przewodności cieplnej pakietu w poprzek blach)



Rys. 14. Obliczona i zmierzona temperatura po 160 min w pkt. pomiarowych 0-4 (wynik kalibracji przewodności cieplnej pakietu wzdłuż blach)

Na rys. 13 i 14 zestawiono wartości temperatury, zmierzone w 160 minucie doświadczenia, w punktach pomiarowych wraz z odpowiadającymi im wynikami obliczeń. Dla tak skalibrowanego modelu numerycznego i przyjętych wartości przewodności cieplnych pakietu blach elektrotechnicznych różnica rezultatów obliczeń w stosunku do pomiarów nie przekracza 2%.

#### 4. Podsumowanie

Obecnie coraz częściej przeprowadzana jest analiza stanu cieplnego maszyn elektrycznych. Dzięki obliczeniom termicznym możemy przewidzieć stan cieplny maszyn i zoptymalizować układ ich chłodzenia. Jednak bez względu na stosowaną metodę obliczeniową oraz oprogramowanie, niezbędne jest podanie poprawnych

własności cieplnych materiałów konstrukcyjnych. Opisana w artykule metoda określania wartości przewodności cieplnej pakietu blach elektrotechnicznych może z powodzeniem być stosowana w zakładach produkcyjnych posiadających zaplecze projektowe, lecz nie posiadających odpowiednich, specjalistycznych urządzeń pomiarowych. Metoda pozwala w prosty sposób skalibrować model obliczeniowy, który może być użyty do skonstruowania modelu obliczeniowego kompletnej maszyny. Pozwala także wyznaczyć zastępcze parametry przewodności cieplnej pakietu blach produkowanego według technologii stosowanej w danym przedsiębiorstwie.

## 5. Literatura

- [1]. Będkowski B., Madej J.: „Możliwości metod 3D FEM i CFD w analizie systemów chłodzenia maszyn elektrycznych - część wstępna”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL*, (94), nr 1, 2012, s. 139-143.
- [2]. Bennion K.: „Electric Motor Thermal Management” National Renewable Energy Laboratory, Washington 2012.
- [3]. Hendershot J. R., Miller T. J. E.: „Design of brushless permanent-magnet motors” Magna Physics Pub., 1994.
- [4]. Kuchynkova H., Hajek V.: „Measurement of temperature of electrical Machines using thermovision camera”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL* 2010; 87: 139-134.
- [5]. Mejuto C., Mueller M., Shanel M., Mebarki A., Staton D.: „Thermal modelling investigation of heat paths due to iron losses in synchronous machines” *Proc. IEEE PEMD*, 2008, s. 225–229.
- [6]. Mukosiej J.: „Problem dokładności badań cieplnych maszyn elektrycznych”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL*, nr 100, 2013, s. 67-72.
- [7]. Mynarek P., Kowol M.: „Analiza cieplna silnika PMSM za pomocą metody elementów skończonych i schematów cieplnych”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL* 2014; 4(104): 49-54.
- [8]. Nategh S., Wallmark O., Leksell M., Zhao S.: „Thermal Analysis of a PMSRM Using Partial FEA and Lumped Parameter Modeling” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 2, 2012, s. 477-488.
- [9]. Polak A., Barański M.: „Termograficzne badania maszyn elektrycznych – na co należy zwrócić szczególną uwagę”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL* 207; 76: 133-136.
- [10]. SanAndres U., Almandoz G., Poza J., Ugalde G.: „Design of Cooling Systems Using Computational Fluid Dynamics and Analytical Thermal Models” *Industrial Electronics. IEEE Transactions* 2014; 8(61): 4383–4391.

### Autorzy

mgr inż. Bartłomiej Będkowski  
b.bedkowski@komel.katowice.pl  
Instytut Napędów i 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