

Bronisław Tomczuk
Andrzej Waindok
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Katedra Elektrotechniki Przemysłowej

POLOWA ANALIZA NAGRZEWANIA AKTUATORA Z UWZGLĘDNIENIEM PROMIENIOWANIA POPRZEZ MODYFIKACJĘ WSPÓLCZYNNIKA KONWEKCJI

FIELD ANALYSIS OF A LINEAR ACTUATOR HEATING INCLUDING RADIATION BY MODIFICATION OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki obliczeń pola temperaturowego analizowanego w siłowniku liniowym tubowym prądu stałego z magnesami trwałymi (PMDCTLA – permanent magnet direct current tubular linear actuator). Badany siłownik jest przeznaczony do pracy ciągłej w stanowiskach do badań zmęczeniowych. Poprawne określenie nagrzewania konstrukcji siłownika jest związane z ograniczeniami dotyczącymi dopuszczalnej temperatury magnesów. Dlatego też, wykonano polowy model matematyczny do analizy nagrzewania z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W przypadku jednoczesnego uwzględnienia promieniowania i konwekcji zmodyfikowano warunek brzegowy poprzez wprowadzenie innowacyjnego współczynnika konwekcji. Określono nieliniowy składnik opisujący zjawisko promieniowania. Osiągnięciami pracy są również obliczenia współczynników statycznego modelu cieplnego, które prawidłowo odwzorowują stan ustalony nagrzewanego obiektu. Przeanalizowano cztery modele statyczne. Różnią się one stopniem uwzględnienia każdego ze zjawisk zachodzących w procesie przepływu ciepła. Wykonanie wielowariantowych obliczeń wymagało wykonania oryginalnego, autorskiego algorytmu. Dzięki jego wdrożeniu było możliwe uwzględnienie nieliniowego warunku brzegowego ujmującego zarówno konwekcję, jak i promieniowanie. Zbadano wpływ uwzględnienia poszczególnych zjawisk fizycznych na czas trwania obliczeń każdego z rozpatrywanych przykładów. Modele numeryczne zweryfikowano pomiarowo.

Abstract: The calculation results for the thermal field analyses in the permanent magnet direct current tubular linear actuator (PMDCTLA) have been presented in the paper. The considered actuator is purposed for the perpetual operation in the fatigue test stand. The proper determination of the actuator heating is related to the limitations connected with the permanent magnet temperature. Thus, for the analysis of the actuator heating, the mathematical field model with finite element method (FEM) has been created. In the case of including both thermal radiation and convective heating the modification of the boundary conditions, by the involving the innovative convective heat transfer coefficient, has been done. The nonlinear component describing the radiation phenomenon, has been determined. The calculations of the static thermal model coefficients, which map correctly the steady-state of the device heating, are some achievements of this work. Four static models have been analyzed. They differ each to other in terms of including each phenomenon occurring in the heat transfer. Execution of the multi-variant calculations required doing of the original, own algorithm. Owing its running it was possible to develop the adequate nonlinear boundary condition for taking into account both thermal convection and radiation. The influence of the physical phenomena including the simulation time of each calculated case, has been studied. The numerical models have been verified experimentally.

Słowa kluczowe: *siłowniki o ruchu liniowym, obliczenia pola temperatury, zjawisko promieniowania ciepła*
Keywords: *linear actuators, thermal field calculations, thermal radiation phenomenon*

1. Wstęp

Projektowanie maszyn elektrycznych wymaga nie tylko określenia ich parametrów elektromagnetycznych, ale również rozkładu pola temperatury w stanie ustalonym. Jest to szczególnie istotne w przypadku maszyn z magnesami trwałymi wykonanymi z ziem

rzadkich, których parametry w istotny sposób zależą od temperatury pracy [1, 5]. Wymaga to stworzenia odpowiedniego modelu cieplnego. Najczęściej stosowane są dwa podejścia. Jedno opiera się na zastępczym schemacie cieplnym – wykorzystuje się tu analogie do obwodów elektrycznych. Drugie podejście polega na rozwiązaniu zagadnienia brzegowego dla

równania różniczkowego cząstkowego obowiązującego w analizowanym obszarze. Najczęściej rozwiązuje się je z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Dla niemal każdego modelu matematycznego, dokonuje się pewnych uproszczeń, mających na celu skrócenie czasu obliczeń. W pracy przedstawiono analizę cieplną siłownika z magnesami trwałymi przeznaczonego do pracy ciągłej w maszynach do badań zmęczeniowych. Porównano ze sobą cztery modele, o różnym stopniu udokładnienia. Podstawowy model zakładał uwzględnienie wymiany ciepła jedynie poprzez konwekcję. W kolejnych modelach uwzględniono zjawisko wymiany ciepła przez promieniowanie oraz zmianę rezystancji uzwojenia pod wpływem temperatury. Uwzględnienie zmian rezystancji jest szczególnie istotnie w przypadku wykorzystania zasilaczy PWM (pulse width modulation), które pracują w charakterze źródła prądowego i wymuszają odpowiedni kształt i wartość skuteczną prądu. Przy wymuszonej wartości prądu wraz ze wzrostem temperatury uzwojenia rosną straty mocy, które są jednymi z danych wejściowych do analizy pola temperaturowego.

2. Obiekt fizyczny

Zdjęcie badanego aktuatora przedstawiono na Rys. 1, natomiast jego najważniejsze wymiary oraz przekrój na Rys. 2. Elementem ruchomym w badanym siłowniku jest uzwojenie. W tabeli 1 podano główne dane znamionowe. Prezentowany siłownik został wykonany w ramach projektu badawczego rozwojowego, realizowanego w Katedrze Elektrotechniki Przemysłowej w latach 2008-2010 [3, 6].

Tabela 1. Najważniejsze dane znamionowe siłownika

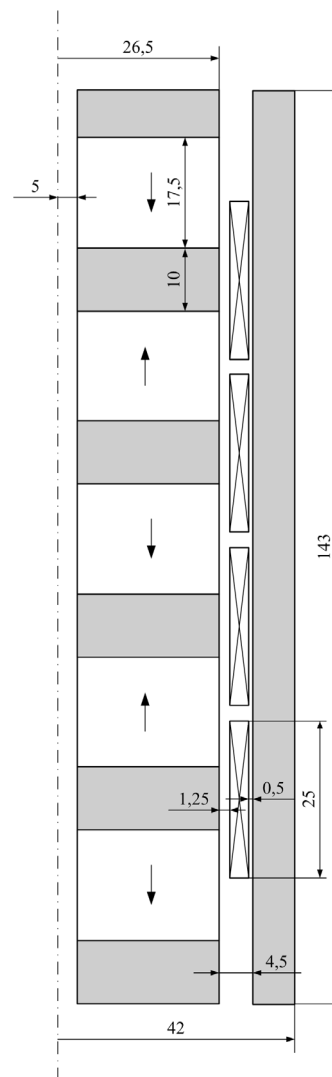
Table 1. The most important nominal data of actuator

Parametr	Wartość
Siła maksymalna [N]	150
Prąd maksymalny (praca ciągła) [A]	1,4
Rezystancja uzwojenia [Ω]	13,85
Długość skoku [mm]	10



Rys. 1. Zdjęcie wykonanego prototypu siłownika

Fig. 1. Picture of the manufactured actuator prototype



Rys. 2. Połowa przekroju środkowej części siłownika wraz z najważniejszymi wymiarami
Fig. 2. The halved cross-section of the actuator middle part with main dimensions [mm]

Widoczne na zdjęciu (Rys. 1) otwory w stojanie zostały wykonane w celu umożliwienia bezstykowego pomiaru temperatury cewek.

3. Model matematyczny

Model matematyczny wykonano w programie FEMM 4.2. Program ten pozwala na obliczanie rozkładu pola termicznego w stanie ustalonym. Ze względu na symetrię osiową silownika, rozkład temperatury T jest wyznaczany z następującego równania Poissona [2]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \kappa \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -p \quad (1)$$

gdzie κ – przewodność cieplna.

W każdej analizie pola, a więc także w obliczeniach cieplnych, istotny jest odpowiedni dobór warunków brzegowych. Na granicy obszaru obliczeniowego zadano warunek Dirichleta (temperatura równa temperaturze otoczenia), natomiast na zewnętrznej granicy silnika zadano warunek na konwekcję

$$\kappa \nabla T \cdot \vec{n} + h(T - T_0) = 0 \quad (2)$$

gdzie T_0 – temperatura otoczenia [K], h – współczynnik konwekcji [$W/(m^2K)$], \vec{n} – wektor normalny do powierzchni zewnętrznej silnika.

W zakresie badanych temperatur istnieje konieczność uwzględnienia zarówno współczynnika konwekcji, jak i współczynnika oddawania ciepła przez promieniowanie. W wielu programach komercyjnych do analizy pola nie jest możliwe zadawanie obydwu tych warunków jednocześnie. W przypadku programu FEMM także nie jest możliwe bezpośrednie uwzględnienie obu współczynników w jednym warunku brzegowym. Niemniej jednak, możliwe jest wykorzystanie skryptów LUA do napisania procedury iteracyjnej służącej przybliżonemu rozwiązaniu przypadku z nieliniowym warunkiem brzegowym.

Zastępczy całkowity współczynnik konwekcji w takim przypadku jest równy sumie współczynnika konwekcji swobodnej oraz współczynnika od promieniowania [2]

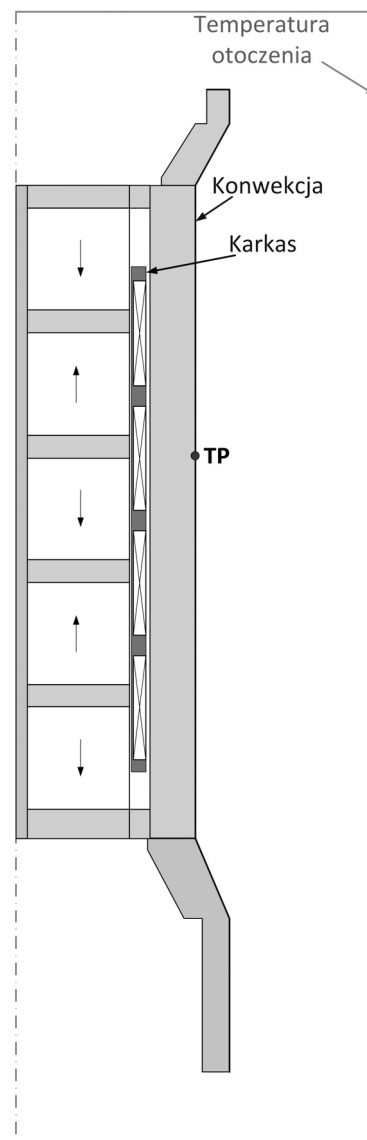
$$h_{zast} = h + 4\sigma\varepsilon \left(\frac{T + T_0}{2} \right)^3 \quad (3)$$

gdzie: σ – stała Boltzmana ($5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2K^4)$), ε – emisyjność powierzchni

oddającej lub przyjmującej ciepło (wartości w granicach 0 do 1).

Powyższa modyfikacja współczynnika konwekcji obowiązuje w zakresie zmian temperatury na poziomie do $200^\circ C$.

Na Rys. 3 przedstawiono przekrój silnika wraz z opisem materiałów oraz warunków brzegowych. Parametry materiałowe (przewodności cieplne) założone do modelowania podano w tabeli 2. W obliczeniach przyjęto temperaturę otoczenia równą zmierzonej, tj. $26,5^\circ C$.



Rys. 3. Warunki brzegowe w modelu przepływu ciepła dla silownika

Fig. 3. The boundary conditions for the heat transfer model of the actuator

Tabela 2. Przewodność cieplna materiałów stosowanych w prototypie siłownika [4, 5]
Table 2. The heat conductivity value of the used materials for the actuator prototype [4, 5]

Materiał	Przewodność cieplna κ [W/(m·K)]
Powietrze	0,031
Stal	54
Miedź	401
NdFeB	7,7

4. Wyniki obliczeń

Obliczenia przeprowadzono dla czterech różnych modeli matematycznych:

- Model A uwzględniający tylko konwekcję swobodną. Przyjęto wartość współczynnika konwekcji $h=5$ W/m²K.
- Model B różniący się od modelu A o uwzględnienie dodatkowo zmiany rezystancji uzwojenia w trakcie nagrzewania.
- Model C uwzględniający oddawanie ciepła przez promieniowanie (współczynnik konwekcji wyrażony wzorem (3)).
- Model D uwzględniający zmianę rezystancji uzwojenia w czasie nagrzewania oraz zjawisko promieniowania poprzez zastępczy współczynnik konwekcji.

W tabeli 3 zamieszczono najważniejsze parametry dla opracowanych modeli matematycznych. Stosunkowo mała wartość współczynnika emisyjności ε wynika z tego, że stojan siłownika był wykonany z oszlifowanej stali.

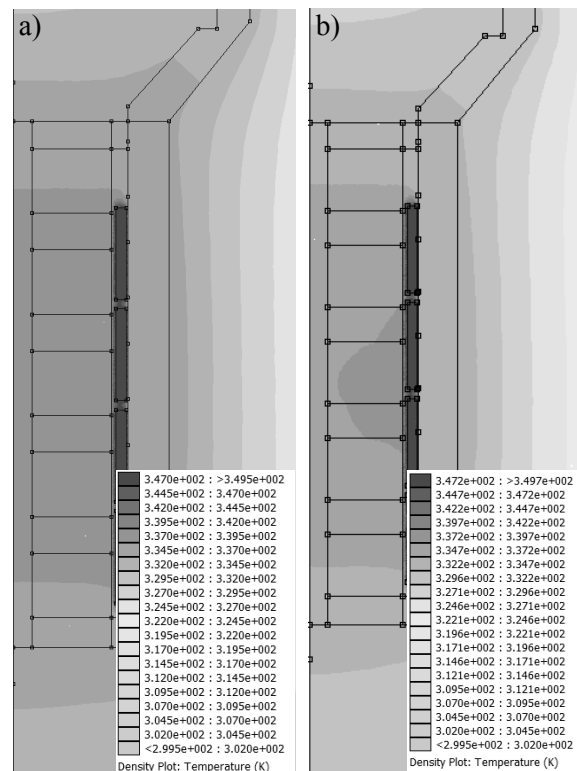
Tabela 3. Parametry założone w modelach matematycznych

Table 3. Parameters included in the mathematical models

Wielkość	Jednostka	Wartość
T_o	[°C]	26,5
I	[A]	1,2
R_{20} (pojedyncza cewka)	[Ω]	3,46
V_{cew}	[m ³]	$12,581 \cdot 10^{-6}$
p (model A i C)	[W/m ³]	413127
ε	-	0,2

Wyniki obliczeń i pomiarów zamieszczono w tabeli 4 oraz na Rys. 4. Temperaturę ustaloną uzwojenia wyznaczono poprzez pomiar rezystancji całego uzwojenia. Temperaturę powierzchni zewnętrznej zmierzono kamerą termowizyjną firmy Flir, model ThermaCAM A320. Pomiary odbywały się przy zatrzymanym biegniku. Należy dodać, że podczas pracy maszyny, gdy biegnik wykonuje ruch posuwisto-zwrotny, występuje zwiększona konwekcja wymuszona i wówczas przyrosty temperatury są mniejsze.

Rozkład pola temperatury w nieznacznym stopniu zależy od wybranego modelu – różnice dotyczą głównie rozkładu temperatury wewnątrz siłownika (Rys. 4). W przypadku modelu D, uwzględnienie promieniowania powoduje nieco większe „wyprowadzanie” ciepła na zewnątrz konstrukcji.



Rys. 4. Rozkład pola temperatury dla:

a) modelu A, b) modelu D

Fig. 4. The temperature field distribution for:
a) A model, b) D model

Uwzględnienie osobno zmiennej rezystancji cewek oraz zjawiska promieniowania wpływa znacząco na wyniki obliczeń (tabela 4). W pierwszym przypadku (model B) wzrost temperatury uzwojenia jest o 24% większy,

natomiast w drugim przypadku (model C) o 16% mniejszy, niż dla modelu uwzględniającego oba te zjawiska (model D). Czas obliczeń jest najdłuższy w przypadku modeli B i D – około 5 razy dłuższy niż w przypadku modelu A.

Tabela 4. Temperatura uzwojeń i stojana po nagraniu silownika

Table 4. Temperature of the windings and the stator after heating of the actuator

Model	Wartość średnia temperatury uzwojenia [°C]	Temperatura w punkcie TP [°C]	Czas obliczeń [s]
1A	76	64	15
1B	88	73	71
1C	68	56	53
1D	76	61	71
Pomiar	80	59	-

Najbliższe pomiarom wyniki obliczeń otrzymano dla modelu A (najmniej dokładnego) oraz modelu D (najbardziej dokładnego z rozważanych). Można to tłumaczyć tym, że nieuwzględnienie (w modelu A) większej (po nagraniu) rezystancji uzwojeń oraz promieniowania powoduje efekt zbliżonego do rzeczywistego transferu energii cieplnej. Tak więc, stosunkowo dobra zgodność z pomiarami wyników obliczeń dla modelu uproszczonego (model A) wynika ze wzajemnego znoszenia się wpływów od dwóch zjawisk fizycznych. Wzrost temperatury wynikający z uwzględnienia przyrostu temperaturowego rezystancji jest kompensowany przez zwiększone oddawanie ciepła poprzez promieniowanie (model D). Dlatego też, stan ustalony można wstępnie analizować stosując model uproszczony, wymagający znacznie krótszego czasu obliczeń niż model udokładniony (tabela 4). Przedstawione obliczenia wykonano na komputerze klasy PC z procesorem AMD Phenom II X4 955 i pamięcią operacyjną 4 GB.

5. Uwagi i wnioski

Autorzy porównali ze sobą cztery obliczeniowe modele cieplne aktuatora o ruchu liniowym. W najbardziej złożonym modelu, wykonanym z wykorzystaniem autorskiego skryptu napisanego w języku LUA, zostały

uwzględnione dwa istotne zjawiska: zmiana rezystancji uzwojenia w funkcji temperatury oraz zjawisko oddawania ciepła przez promieniowanie. Drugie z wymienionych zjawisk wymagało modyfikacji standardowego warunku brzegowego dla zjawiska konwekcji poprzez obliczenie nieliniowego członu związanego z promieniowaniem. Ze względu na znacznie większą komplikację modelu, czas obliczeń w porównaniu z modelem uproszczonym wzrósł cztero-, a nawet pięciokrotnie. Jednakże dla stosunkowo dobrego sprzętu obliczeniowego czasy te są niewielkie, a wyznaczenie temperatury uzwojeń na etapie projektowania ma duże znaczenie poznawcze i praktyczne.

Opracowane modele termiczne aktuatorów zostały zweryfikowane pomiarowo dla statycznego pola temperatury (parametr różniczkowy modelu termicznego). Otrzymano dobrą zgodność w przypadku modelu uproszczonego oraz udokładnionego.

6. Literatura

- [1] Gieras J.F., Piech Z.J., Tomczuk B.Z., *Linear synchronous motors*, USA, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.
- [2] Lide D.R., *Handbook of chemistry and physics*, 84th Edition, USA, CRC Press LLC, 2004.
- [3] Tomczuk B., Waindok A., *Linear motors in mechatronics – achievements and open problems*, w: Transfer of innovation to the interdisciplinary teaching of mechatronics for the advanced technology needs, Opole University of Technology, Opole, Poland, OWPO, 2009, 343-360.
- [4] Informacja na www.mmcmagnetics.com (stan na 02.04.2013r.).
- [5] Waindok A.: *Obliczanie i pomiar nagrzewania tubowego silnika liniowego z magnesami trwałymi*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 66, Studia i monografie Nr 32, 2012, s. 304-311.
- [6] Tomczuk B., Waindok A., Wajnert D.: *Obliczenia pola magnetycznego i jego parametrów całkowych w aktuatorze liniowym oscylacyjnym z magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 87, 2010, wyd. BOBRME Komel, s. 79-84.

Autorzy

Bronisław Tomczuk – w roku 2007 uzyskał tytuł profesora. Od roku 1996 jest zatrudniony na stanowisku profesora w Politechnice Opolskiej, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki.

Prace w dziedzinie komputerowego modelowania i weryfikacji pomiarowej pola elektromagnetycznego w celu optymalizacji układów transformatorowych publikuje od 1977 roku. Od roku 2001 zajmuje się obliczeniami i weryfikacją pomiarową wyników w odniesieniu do układów elektromagnetycznych o ruchu liniowym. Należy tu wymienić aktulatory i łożyska magnetyczne. Doktorat i habilitacja na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Biografia zamieszczona w „Who’s Who in the World”. Około 200 publikacji w renomowanych czasopismach zagranicznych i krajowych jak: IEEE Trans. on Magnetics (USA), Compel (Londyn), Electrical Engineering (Berlin), Archiwum Elektrotechniki, Przegląd Elektrotechniczny, Energetyka. Członek SEP, PTETiS, Compumag Society (Londyn) oraz opracowań w ramach projektów badawczych centralnych.

Andrzej Waindok - stopień dr inż. uzyskał na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej w 2008 roku. Jego zainteresowania obejmują modelowanie pól elektromagnetycznych w zastosowaniu do projektowania wspomaganego komputerem (CAD). Obecnie zajmuje się analizą pola magnetycznego aktuatorów liniowych i transformatorów. Posiada 60 publikacji, w tym w renomowanych czasopismach zagranicznych i krajowych oraz opracowań w ramach projektów badawczych centralnych. Członek SEP, PTETiS, Compumag Society (Londyn) i polskiej sekcji IEEE Magnetics Society (Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York).

Informacje dodatkowe

This paper is partially supported by the Polish Ministry of Science and Higher Education under grant no. N N510 533739.

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaq