

## **Analiza wybranych charakterystyk liniowego silnika tubowego indukcyjnego**

**Streszczenie.** W oparciu o przeprowadzoną analizę przedstawiono wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych liniowego silnika tubowego indukcyjnego (LSTI) na jego charakterystyki. Omówiono propozycję algorytmu projektowych badań studialnych i zamieszczono wybrane rezultaty badań symulacyjnych. Pokazano, że istotny wpływ na charakterystyki LSTI mają obciążenia elektromagnetyczne, parametry projektowe, podłużny efekt końcowy i dopuszczalna temperatura dla danej klasy izolacji.

**Abstract.** On the base of the analysis, the influence of the selected design data on the LITM operational performances has been presented in this article. The proposal of the design study research algorithm has been described by the Author and the chosen results of the simulation testing are included as well. The outcomes of simulation have revealed the electromagnetic load, construction parameters, longitudinal end effect and an admissible temperature for a given class of insulation have an essential influence on the LITM performances. (**Analysis of chosen performances of the linear induction tubular motor**).

**Słowa kluczowe:** silnik liniowy tubowy, parametry projektowe, symulacja.

**Keywords:** linear tubular motor, construction parameters, simulation.

### **Wstęp**

Wiek XXI można nazwać wiekiem mechatroniki i informatyki, podobnie jak wiek XIX – pary, a XX – elektryczności. W wyniku postępu technicznego w mikroelektrotechnice, technice komputerowej i elektromechanice nowej generacji wyłoniła się nowa dyscyplina pod nazwą mechatronika [1, 2].

Liniowy napęd mechatroniczny składa się zwykle z silnika elektrycznego, reduktora o dużym przełożeniu, układów elektronicznych, elektronicznych modułów mocy oraz oprogramowania komputerowego. Ważną rolę w tym procesie spełniają członcy wykonawcze, zwane też aktorami. Pośród tej grupy ważną rolę spełniają aktory elektromechaniczne, a szczególnie liniowe silniki tubowe (LST). Liniowe silniki asynchroniczne, obok wielu zalet, posiadają także niedostatki [3, 4, 5, 6, 7]. Wśród tych drugich problem ciepła wytwarzanego w silnikach jest jednym z najtrudniejszych zagadnień technicznych, które mają zasadniczy wpływ na charakterystyki eksploatacyjne silnika [8]. Celem pracy jest analiza wybranych aspektów procedury projektowania LST oraz obliczeń stanów przejściowych elektromechanicznych i termicznych.

### **Wybór strategii projektowania**

LST ze względu na korzystny stosunek siły ciągu do masy oraz niewielkie pola rozproszenia znajdują coraz szersze zastosowanie wśród wielu typów serwonapędów liniowych w systemach mechatronicznych. Jak już wspomniano mają one swoje niedostatki; wśród nich system łożyskowania części wtórnej. Ekspertki szacują jednak, że w przyszłości mogą one zastąpić napędy hydrauliczne i pneumatyczne w niektórych aplikacjach.

Wykorzystanie materiałów czynnych w silnikach elektrycznych charakteryzuje parametr wyzyskania [9, 10]:

$$(1) \quad \sigma = 1,11 A_s B_\delta \cdot 10^{-5} \text{ [kV}\cdot\text{A}\cdot\text{min/m}^3]$$

gdzie:  $B_\delta$  – indukcja w szczelinie powietrznej,  $A_s$  – okład prądowy.

Doboru współczynnika wyzyskania maszyny  $\delta$  należy dokonywać z rozważą, gdyż stosunek  $B_\delta/A$  wpływa na właściwości użytkowe projektowanej maszyny. Ma on również decydujący wpływ na obciążenie cieplne, współczynnik mocy,  $\cos\varphi$  i siłę maksymalną  $F_{max}$ .

Indukcja w szczelinie powietrznej  $B_{\delta m}$  dla LSTI posiada wartości znacznie mniejsze niż w silnikach obrotowych i rekomenduje się, by przyjmować ją w granicach  $0,3 \div 0,9 \text{ T}$  - w zależności od mocy silnika. Okład prądowy  $A$  wybiera się z przedziału  $10 \cdot 10^4 \div 50 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ , uwzględniając przy tym, że  $A$  wpływa bezpośrednio na parametr  $F_N$ , który jest proporcjonalny do gęstości strat mocy wydzielających się w uzwojeniu i zależy od zastosowanej klasy izolacji oraz sposobu chłodzenia maszyny. Jest on definiowany jako:

$$(2) \quad F_N = A \cdot J$$

gdzie:  $A$  – okład prądowy [A/m],  $J$  – gęstość prądu [A/mm<sup>2</sup>].

Należy zadbać, aby parametr ten nie przekroczył pewnej wartości, przy której uzwojenie osiąga graniczny dopuszczalny przyrost temperatury.

Przy projektowaniu LST procedura jest podobna, jak przy silniku klasycznym, tym niemniej występuje pewna odmienna specyfika związana z osobliwością zjawisk fizycznych występujących w liniowych silnikach tubowych. Do ważniejszych etapów projektowania LSTI należą [4, 7, 9]:

1. Zestawienie wymagań techniczno-eksploatacyjnych;
2. Obliczenia wstępne wymiarów głównych połączone z uproszczoną procedurą optymalizacyjną;
3. Projekt części pierwotnej i wtórnej.
4. Analiza parametrów schematu zastępczego i charakterystyk.
5. Połowa analiza studialna połączone z optymalnym wyborem parametrów silnika.
6. Przeprowadzenie obliczeń ciepłno-wentylacyjne.

Przy wyborze rozwiązań projektowych należy w pierwszym etapie rozstrzygnąć, które z kryteriów projektowych mają największą rangę. Do najważniejszych spośród nich trzeba zaliczyć:

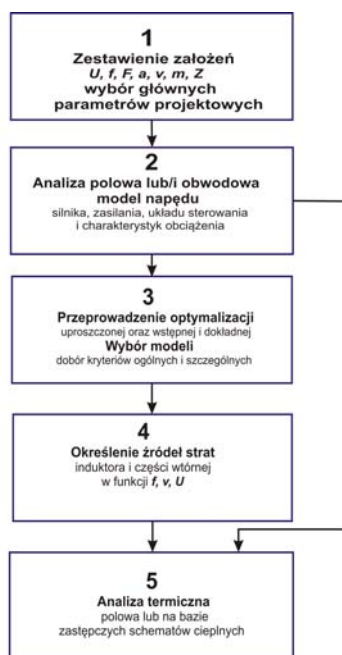
- a) normatywno-ekonomiczne; urządzenie powinno być zaprojektowane tak, aby spełniało normy przy minimalnych kosztach,
- b) jakości konstrukcji Laithwaite'a – wyrażone przez parametr  $\varepsilon_0$ , który określa istotne właściwości maszyny,
- c) energooszczędność - definiowana różnymi parametrami, np. stosunkiem pobieranej energii do siły ciągu,
- d) dynamiczność - wyrażoną wartością przyspieszenia lub zrywnością maszyny.

Natomiast w drugim etapie prowadzi się kompleksowe badania studialne procesów elektromechanicznych i cieplnych w stanach ustalonych i przejściowych, wg algorytmu pokazanego na rys. 1.

Na początku badań (blok 1) zestawiamy i analizujemy założenia projektowe oraz dokonujemy wyboru głównych rozmiarów z wykorzystaniem optymalizacji uproszczonej. W drugim kroku (blok 2) zestawiamy lub opracowujemy adekwatne modele matematyczne do analizy stanów ustalonych i procesów przejściowych liniowego układu napędowego. W kolejnym etapie (blok 3) formułujemy kryteria optymalizacji oraz dokonujemy optymalizacji wstępnej i dokładnej całego systemu napędowego wraz z silnikiem lub wybranymi jego elementami. Przedostatni krok (blok 4) związany jest z

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

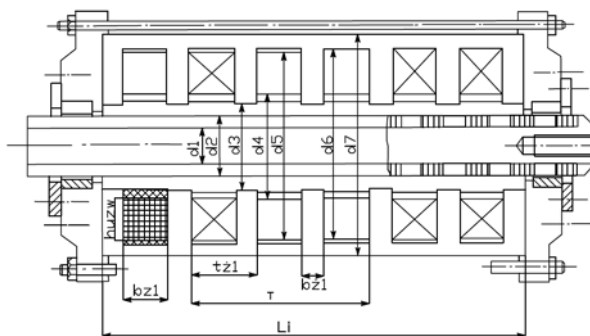
wyznaczeniem strat występujących w silniku. W końcowym stadium badań (blok 5) analizujemy procesy cieplne i - w zależności od rezultatów - dokonujemy weryfikacji założeń lub projektujemy system chłodzenia.



Rys. 1. Ogólny algorytm projektowych badań studialnych LST

### Wybór głównych rozmiarów

Projektowanie silników zaczyna się od określenia rozmiarów głównych – wewnętrznej średnicy induktora  $d_3$  i jego aktywnej długości  $L_i$ . Na rys. 2. pokazano jeden ze schematów konstrukcyjnych LST1, który autor wykorzystuje w obliczeniach. Aby określić związek między głównymi rozmiarami i obciążeniami elektromagnetycznymi, należy porównać wyrażenia na moc obliczeniową maszyny -wyrażoną w funkcji parametrów „wewnętrznych” - z mocą wyrażoną przez „zewnętrzne” parametry obliczeniowe.



Rys. 2. Schemat konstrukcyjny LST1

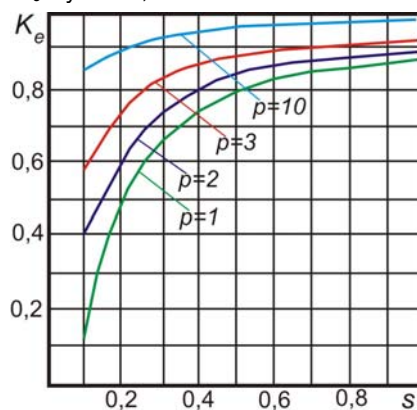
Moc obliczeniową maszyny w funkcji parametrów „wewnętrznych”:

$$(3) \quad P'_{obl} = \pi \cdot \sqrt{2} K_f K_{ws1} \alpha_\delta \mathcal{F}_1 L_i d_3 A B_\delta m$$

oraz „zewnętrznych” parametrów znamionowych:

$$(4) \quad P''_{obl} = \frac{K_E P_N}{K_e \eta_n \cos \varphi_N}$$

W wyrażeniu (4) uwzględniono wpływ podłużnego efektu końcowego  $K_e$  [5], którego zmianę w funkcji liczby par biegunów „ $p$ ” i poślizgu „ $s$ ” pokazano na rys. 2. Dla przykładu przy  $p=2$  i poślizgu  $s=0,4$   $K_e$  wynosi 0,8.



Rys. 2. Rodzina krzywych  $K_e=f(p,s)$

Przyrównując zależności (3) i (4) oraz dokonując przekształceń otrzymujemy wzór do obliczenia wewnętrznej średnicy induktora LSTI:

$$(5) \quad d_3 = \frac{\sqrt{2} K_E F_N K_\eta}{\pi K_e K_f K_{ws1} \alpha_\delta \cos \varphi_N L_i A B_\delta}$$

Współczynniki  $\alpha_\delta$ ,  $K_E$ ,  $K_f$ ,  $K_{ws1}$ ,  $K_e$ ,  $K_\eta$  i  $\cos \varphi$  można uznać za niezmiennie w określonych przedziałach, zatem rozmiary maszyny zależą głównie od obciążeń elektromagnetycznych  $A \cdot B_\delta$ . Po wyznaczeniu  $d_3$ , biorąc pod uwagę wymogi konstrukcyjne napędu z LSTI, a zwłaszcza założoną długość ruchu części wtórnej, i uwzględniając parametr smukłości maszyny w granicach  $\lambda = 4 \div 8$  otrzymujemy drugi podstawowy parametr konstrukcyjny – aktywną długość induktora:

$$(6) \quad L_i = \lambda d_3$$

Następnie określa się wymiary geometryczne żłobków i zębów induktora oraz części wtórnej. Oblicza się liczbę zwojów fazy i wybiera średnicę przewodu nawojowego. Kolejnym krokiem jest określenie indukcji w szczelinie powietrznej, zębach i jarzmie induktora. Po wyznaczeniu parametrów schematu zastępczego i obliczeniu charakterystyk roboczych LST przeprowadza się ocenę nagrzewania silnika w celu

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

sprawdzenia, czy nie została przekroczona dopuszczalna temperatura elementów silnika. Najwrażliwsze są uzwojenia; gdy temperatura przekracza dopuszczalne wartości, dokonuje się korekty parametrów projektowych, w tym  $A$  i  $B_\delta$ .

Odpowiedni dobór wymiarów geometrycznych silnika ma znaczący wpływ na jego pozostałe parametry geometryczne i elektromagnetyczne. W tabeli 1. przedstawiono wpływ wybranych parametrów na charakterystyki silnika.

Tabela 1.

Parametr	Zwiększenie	Zmniejszenie
Szczelina powietrzna $g$	Większy prąd magnesujący Większe straty	Większy współczynnik $\varepsilon_0$ Większa siła ciągu Większa sprawność
Podziałka biegunowa $\tau$	Duże $\varepsilon_0$ Zwiększenie grubości jarzma magnetowodu	Duża liczba biegunów
Liczba biegunów $2p$	Mniejsze efekty końcowe	Większa reaktancja rozproszenia od strumieni rozproszenia części wtórnej
Grubość części wtórnej $d$	Duże $\varepsilon_0$ Duży prąd rozruchu	Duża reaktancja rozproszenia od strumieni rozproszenia części wtórnej
Oporność części wtórnej $\rho$	Mniejsze efekty końcowe	Duży współczynnik $\varepsilon_0$ Mniejsze straty w części wtórnej
Szerokość zęba $t_z$	Duża oporność rozproszenia	Duża siła ciągu Duża sprawność

### Badania studialne

W początkowym etapie projektowania celowe jest wykorzystanie uproszczonych metod obliczeń optymalizacyjnych z ograniczeniem liczby parametrów zmiennych. Przy takim podejściu funkcja celu dla jednego z wariantów może przyjąć postać:

$$(7) \quad F_c = w_1 C_w^* + w_2 \eta^* + w_3 F_e^*$$

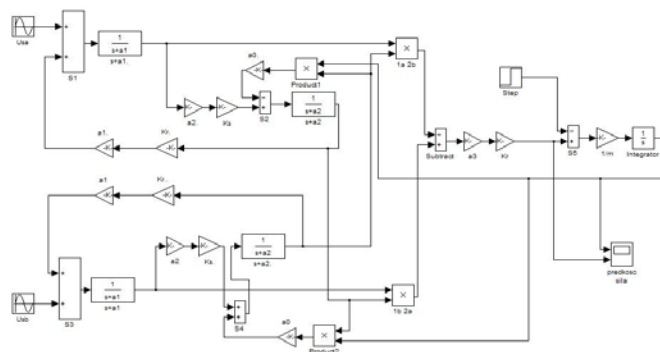
gdzie:  $C_w$  – jednostkowa siła wyrażona stosunkiem jej wartości znamionowej do całkowitej masy silnika,  $\eta$  – sprawność,  $F_e$  – siła elektromagnetyczna,  $w_i$  – wagowe współczynniki, określające rangę danego kryterium w funkcji celu ( $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ )

W ramach badań studialnych przystępujemy do obliczeń obwodowych i polowych maszyny [11, 12, 13] z wykorzystaniem specjalistycznych programów komputerowych np.: MATLAB Flux3D, COMSOL czy Elcut, w których parametry i charakterystyki maszyny są wyznaczone bezpośrednio na podstawie rozkładu pola elektromagnetycznego. Obecnie proces interaktywnego projektowania i optymalizacji [1] wykorzystuje symulacje komputerową, która wymaga jednak tworzenia, w miarę możliwości, dokładnych modeli matematycznych zjawisk zachodzących w LSTI.

$$(8) \left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{1u}}{dt} = u_{1u} - \frac{\pi}{\tau} v_s \alpha'_s \Psi_{1u} + \frac{\pi}{\tau} v_s \alpha'_s K_r \Psi_{2u} + \frac{\pi}{\tau} v_k \Psi_{1v} \\ \frac{d\Psi_{1v}}{dt} = u_{1v} - \frac{\pi}{\tau} v_s \alpha'_s \Psi_{1v} + \frac{\pi}{\tau} v_s \alpha'_s K_r \Psi_{2v} - \frac{\pi}{\tau} v_k \Psi_{1u} \\ \frac{d\Psi_{2u}}{dt} = -\frac{\pi}{\tau} v_s \alpha'_r \Psi_{2u} + \frac{\pi}{\tau} v_s \alpha'_r K_s \Psi_{1u} + \frac{\pi}{\tau} (v_k - v) \Psi_{2v} \\ \frac{d\Psi_{2v}}{dt} = -\frac{\pi}{\tau} v_s \alpha'_r \Psi_{2v} + \frac{\pi}{\tau} v_s \alpha'_r K_s \Psi_{1v} - \frac{\pi}{\tau} (v_k - v) \Psi_{2u} \\ F = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi^2 v_s K_r}{\tau^2 \sigma X_s} K_{ef} (\Psi_{2u} \Psi_{1v} - \Psi_{1u} \Psi_{2v}) \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} (F - F_{zew}) \\ v = \frac{dx}{dt} \end{array} \right.$$

gdzie:  $K_{ef} = K_s \cdot K_e$  – współczynnik uwzględniający efekt naskórkowości i podłużne efekty końcowe.

Model matematyczny napędu liniowego z LSTI [6, 7, 8] tworzy układ równań różniczkowych (8). Do badań symulacyjnych w środowisku MATLABSimulink opracowano schemat blokowy i określono parametry modelu matematycznego (Rys. 2).



Rys.2. Schemat blokowy LSTI

W pracy przytoczono badania symulacyjne przeprowadzone dla dwóch fizycznych modeli liniowych silników tubowych typu LC1 i TW1.

Dane silników:

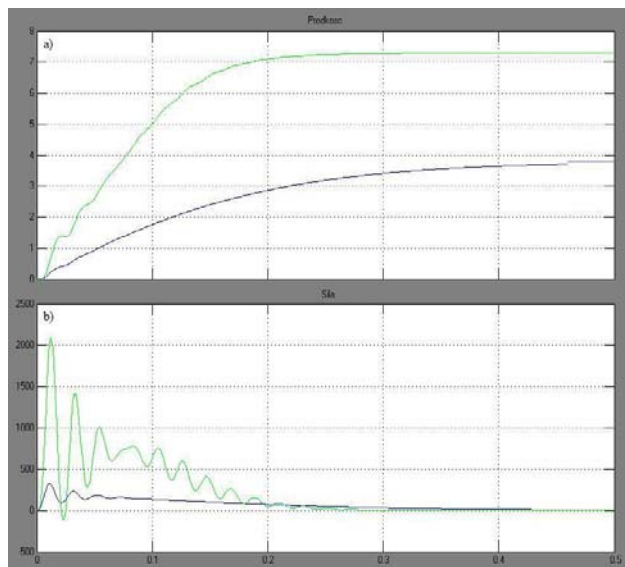
1. LC1:  $p=6$ ,  $m=9\text{kg}$ ,  $\tau=3,8 \cdot 10^{-2}\text{m}$ ,  $v=3,8\text{m/s}$ ,  $F=45\text{N}$
2. TW1:  $p=1$ ,  $m=13\text{kg}$ ,  $\tau=7,3 \cdot 10^{-2}\text{m}$ ,  $v=7,3\text{m/s}$ ,  $F=100\text{N}$

W rezultacie otrzymano, m.in. przebiegi prędkości –  $v$  i siły ciągu –  $F$  dla dwóch ww. silników podczas rozruchu (rys. 3).

Przeprowadzone badania eksperymentalne modeli fizycznych pozwoliły porównać ich wyniki z rezultatami badań symulacyjnych i stwierdzić ich zadowalającą zbieżność. Na podstawie wyników badań symulacyjnych dokonano analizy porównawczej wybranych charakterystyk dwóch typów silników cylindrycznych. Pierwszy z nich o  $p=6$ , silnik LC1 ma stałą elektromechaniczną  $T_{em1}=0,21\text{s}$  i stosunkowo małe pulsacje siły oraz charakteryzuje się parametrami dynamicznymi: przyspieszeniem  $a=4,77\text{m/s}^2$  i zrywnością  $Z=F \cdot a=214,65\text{Nm/s}^2$ . Drugi silnik TW1 o  $p=2$  ma stałą czasową krótszą

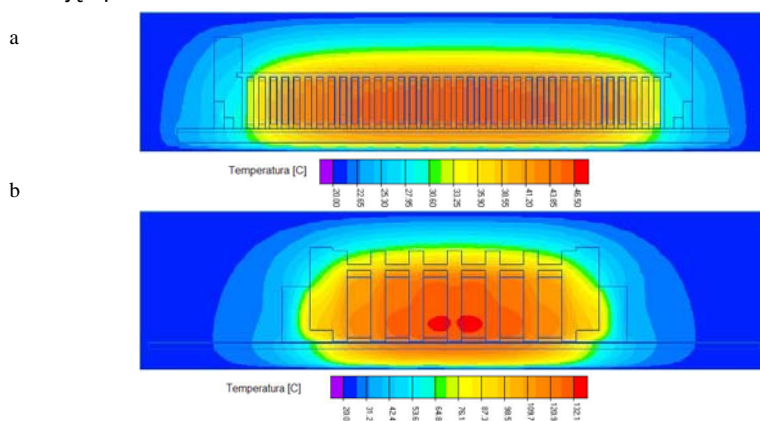
## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

$T_{em2}=0,15s$ ,  $a=7,69m/s^2$   $Z=769,23Nm/s^2$ , ale występują w nim znaczące pulsacje siły ciągu i daje się wyraźnie zauważyć wpływ efektu końcowego.



Rys. 3. Charakterystyki rozruchu LSTI siły ciągu  $F_c$  (a) i prędkości  $v$  (b) dla silników typu — LC1 i — TW1

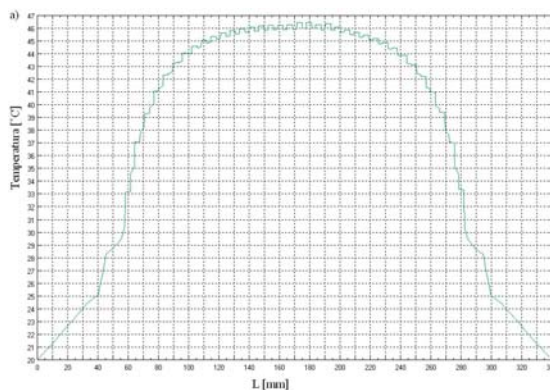
Ze względu na specyfikę konstrukcji LSTI wymagają szczególnego zwrócenia uwagi na zagadnienia termiczne [14, 15]. Nie zawsze właściwie analizowane są przy projektowaniu i eksploatacji LSTI zagadnienia cieplne. Analiza pozwala na bardziej dokładne sprawdzenie wymogów stawianych przez normy i formowanie rozkładu pola temperatury w celu lepszego wykorzystania materiałów konstrukcyjnych i zwiększenia niezawodności maszyny. Ciepło z induktora LSTI oddawane jest do otoczenia poprzez konwekcję i promieniowanie.



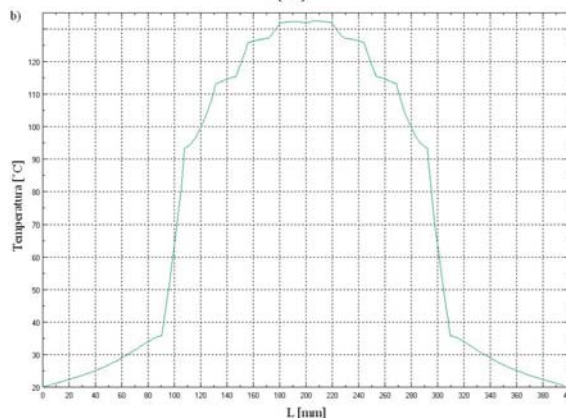
Rys. 4. Obraz pól temperaturowych silników LSTI typu: a) LC1, b) TW1

Analizując np. rozkład temperatury można zauważyć, że maksymalna temperatura LSTI jest na połowie wysokości uzwojeń. W celu dokładniejszego określenia najbardziej nagrzewającego się punktu zbadano rozkład temperatury na promieniach odpowiednio dla silnika TW1  $r=54\text{mm}$  i LC1 –  $r=29\text{mm}$  od środka silnika (Rys. 5).

a



b



Rys. 5. Rozkłady temperatur maksymalnych dla LSTI typu: LC1 (a) i TW1 (b)

Wyniki badań symulacyjnych porównano z badaniami eksperymentalnymi [16]. Okazało się, że są one zbieżne z zadowalającą dokładnością. Analiza pozwoliła uzyskać obraz pola temperaturowego silnika i określić obszary o najwyższej temperaturze. Dla silnika LC1 spełnione są wymogi normy; temperatura nie przekracza  $47^{\circ}\text{C}$ , natomiast dla silnika TW1 przegrzane są cewki 3. i 4., a temperatura dochodzi do  $133^{\circ}\text{C}$ , co jest niedopuszczalne. Należy skorygować obciążenia elektromagnetyczne lub przewidzieć system chłodzenia.

### Podsumowanie

Współczesne wymagania stawiane liniowym napędom z indukcyjnymi silnikami tubowymi w zróżnicowanych aplikacjach wymagają systemowego podejścia do projektowania silnika. Sama procedura oraz zastosowane metodyki i narzędzia do komputerowego projektowania powinny zapewnić możliwie krótki czas do opracowania mechatronicznego wyrobu i jego wdrożenia.

W pracy przedstawiono algorytm projektowych badań studialnych LSTI oraz omówiono wybrane etapy jego realizacji, m.in. zaproponowano wzór do obliczenia



## **VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010**

podstawowego parametru, jakim jest wewnętrzna średnica induktora oraz zamieszczono wybrane wyniki badań symulacyjnych związanych z analizą procesów elektromechanicznych i cieplnych. Pokazano w wybranych badaniach, że istotny wpływ na charakterystyki silnika mają obciążenia elektromagnetyczne, parametry projektowe, podłużny efekt końcowy i reżimy temperaturowe.

### LITERATURA

- [1] Turowski J., Podstawy mechatroniki, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Humanistyczno – Ekonomicznej w Łodzi, Łódź, 2008
- [2] Podurajev Y.V., Mechatronika: osnovy, metody, primenienie, Maszynostroenie, Moskwa, 2007
- [3] Gieras J.F.: Linear induction drives, Oxford Science Publications, Oxford, 1994
- [4] Nasar S.A., Boldea I., Linear motion electric machines, John Wiley & Sons Inc, 1976
- [5] Boldea I., Nasar S.A., Linear motion electromagnetic systems, A Wiley-Interscience Publication, 1985
- [6] Sokołov M.M., Sorokin L.K.: Elektroprivod s lineijnymi asynchronnymi dvigatelami, Energia, Moskwa, 1974
- [7] Sokołowa E.M., Moszyński Y.A.: Cilindriczjeskije lineijnyje asynchronnyje dvigateli, Izd. MEI, Moskwa 1998
- [8] Kosmol J.: Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie, WNT Warszawa 1998
- [9] Dąbrowski M.: Projektowanie maszyn elektrycznych – prądu przemiennego, WNT, Warszawa, 1994
- [10] Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V., Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley & Sons Ltd., 2008
- [11] Demenko A., Obwodowe modele układów z polem elektromagnetycznym, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2004
- [12] Demenko A., Symulacja dynamicznych stanów pracy maszyn elektrycznych w ujęciu polowym, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1997
- [13] Nowak L., Modele polowe przetworników elektromechanicznych w stanach nieustalonych, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1999
- [14] Bula K., Identyfikacja stałych parametrów termicznych w schemacie cieplnym silnika liniowego płaskiego, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Elektrotechnika z.18, Nr 146, 1996
- [15] Rafałski W., Kamiński M., Budowa maszyn elektrycznych, część II, wybrane zagadnienia obliczeń ciepło-wentylacyjnych. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 1982
- [16] Mukosiej J., Zapaśnik R., Badanie cieplne i wentylacyjne maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa, 1964

**Autor:** mgr inż. Sebastian Wiszniewski, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Elektrotechniki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: [wisz@zut.edu.pl](mailto:wisz@zut.edu.pl)

