

## Analiza stanów cieplnych nieustalonych w silnikach indukcyjnych liniowych

**Streszczenie.** W pracy omówiono osobliwości silników indukcyjnych liniowych i zaproponowano trzy modele matematyczne do ich analizy w oparciu o detalizowane zastępcze schematy cieplne o różnym stopniu adekwatności. W drugiej części przedstawiono wybrane rezultaty badań symulacyjnych pokazujące nagrzewanie się poszczególnych elementów konstrukcyjnych silnika - zarówno przy nieruchomej, jak i poruszającej się jego części wtórnej.

**Abstract.** In the paper the features LIM are considered and three mathematical models are developed with help of detailed thermal equivalent circuits. These circuits are distinguished by different degrees of adequacy. In the second part of the paper the outcomes of a computer simulation are presented and heating of the LIM different components at both unmovable and movable states of the secondary element is discussed. (*Thermal analysis of the linear induction motors at non-stationary operation*).

**Słowa kluczowe:** zastępczy schemat cieplny, silnik indukcyjny liniowy, symulacja, procesy przejściowe.

**Keywords:** thermal equivalent circuit, linear induction motor, simulation, transient analysis.

### Wstęp

W praktyce przemysłowej coraz szersze zastosowanie znajdują silniki indukcyjne liniowe (SIL), umożliwiające budowę wysoko dynamicznych układów napędów elektrycznych różnej mocy. Charakteryzują się one szerokim zakresem prędkości ruchu induktorów lub części wtórnej (CzW) i zróżnicowanymi wartościami sił pociągowych oraz rodzajami pracy przy wysokich obciążeniach cieplnych [1, 2, 3].

Jednym z głównych kryteriów przy wyborze silnika elektrycznego jest sprawdzenie, czy nie przekracza on dopuszczalnej temperatury. Uzwojenie silnika z przewodów emaliowanych jest najbardziej wrażliwe na krótkotrwałe przekroczenie tej temperatury. Stąd w obliczeniach projektowych sprawdza się m.in. wartość przyrostu temperatury. Wiąże się z tym problem opracowania odpowiednich modeli matematycznych, pozwalających z wymaganą dokładnością określać temperaturę części składowych silnika.

Projektant napędu liniowego powinien odpowiedzieć na dwa zasadnicze pytania: pierwsze - Czy SIL spełnia wymogi dopuszczalnej temperatury dla danego rodzaju pracy i klasy izolacji? oraz drugie - Jaki jest zapas, a dokładniej, jakie są rezerwy zwiększenia jego obciążenia? Tak więc problematyka badań i obliczeń nagrzewania SIL jest zagadnieniem aktualnym i posiadającym znaczenie praktyczne.

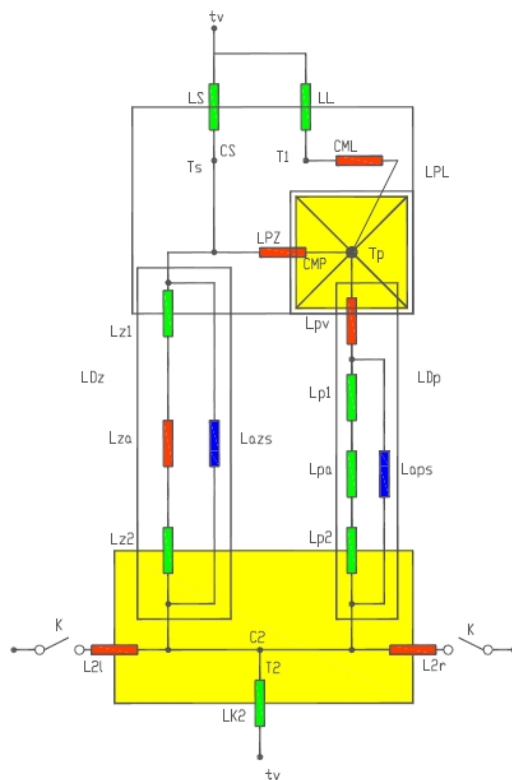
Ze względu na charakter procesów cieplnych SIL istotnie różnią się od klasycznych silników obrotowych. Induktor i CzW najczęściej pracują w reżimie pracy dorywczej (S2) i okresowej (S3) [4, 5]. Podstawowe różnice polegają przede wszystkim na: braku samowentylacji, występowaniu dodatkowych strat wskutek niesymetrii prądów fazowych i efektów końcowych, zróżnicowaniu warunków chłodzenia uzwojeń i obszarów rdzenia z powodu otwartego obwodu magnetycznego, a także stałego przemieszczania się CzW względem aktywnego obszaru induktora. Straty cieplne, wydzielające się w CzW, regularnie „wynoszone” są poza granicę aktywnego obszaru elektromagnetycznego, w

rezultacie czego względne czasy pracy CzW -  $\varepsilon_{CzW}$  i induktora -  $\varepsilon_{in}$  różnią się, co wpływa na specyfikę obliczeń cieplnych. Wymiary konstrukcyjne SIL o względnie dużych parametrach geometrycznych podłużnych nie pozwalają rozpatrywać go w charakterze jednorodnej masy cieplnej.

Analiza literatury poświęconej SIL pozwala stwierdzić, że badacze niewystarczającą uwagę poświęcają problematyce cieplnej, a zwłaszcza analizie stanów nieustalonych. Interesujące publikacje [1, 5], które podejmowały tę problematykę, dotyczą stanów ustalonych, wyjątek stanowią tu publikacje [2, 4, 6, 7]. Celem pracy jest przedstawienie metodyki obliczeń nagrzewania SIL w procesach przejściowych, zaprezentowanie modeli matematycznych i rezultatów wybranych badań tych silników. Dostarczają one informacji niezbędnych przy projektowaniu napędu i ukazują nagrzewanie się ważniejszych elementów konstrukcyjnych SIL.

### Modele matematyczne

Przy badaniach cieplnych wzięto pod uwagę odpowiednio dużą szczelinę powietrzną między induktorem i CzW ( $\delta \geq 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ), pozwalającą przeprowadzić obliczenia cieplne oddzielnie dla induktora i CzW.

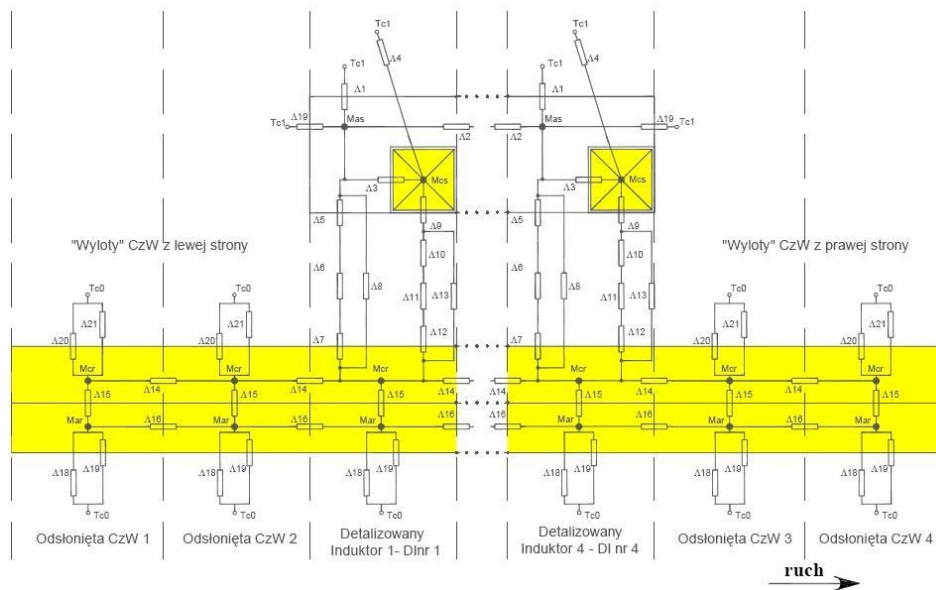


Rys. 1. Integralny zastępczy schemat cieplny dla modelu 1. i 2.

Uzwojenie, podobnie jak przy maszynach wirujących, rozdzielono na dwie części: żłobkową i połączeń czołowych; a straty rozłożono proporcjonalnie do długości odcinków. Dla przypadku z nieruchomą CzW, za podstawę modelu cieplnego SIL przyjęto metodę zastępczych schematów cieplnych przedstawioną na rys. 1. Dodatkowo

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

wprowadzono wyłącznik „K” dla uwzględnienia wpływu pasywnych wylotów maszyny z lewej i prawej strony induktora i aktywnego obszaru pod induktorem (rys. 2). Gdy wyłącznik jest otwarty  $K=0$ , CzW nie wystaje poza granice aktywnego obszaru induktora i wyrażona jest jedną masą cieplną  $m_2$ .



Rys. 2. Detalizowany zastępczy schemat cieplny dla cztero biegowego SIL typu SL-5-100

Układ równań różniczkowych równowagi cieplnej (rys. 1), bez uwzględnienia wzajemnego wpływu CzW w obszarach aktywnych pod induktorem i pasywnych poza nim, a także promieniowania, zapisuje się w formie:

$$(1) \quad \left. \begin{aligned} C_{ML} \frac{dT_1}{dt} &= L_{PL}(T_p - T_1) + L_L(t_v - T_1) + P_l, \\ C_{MP} \frac{dT_n}{dt} &= L_{PL}(T_1 - T_p) + L_{PZ}(T_s - T_p) + L_{Dp}(T_2 - T_p) + P_p, \\ C_S \frac{dT_s}{dt} &= L_{PZ}(T_p - T_s) + L_{Dz}(T_2 - T_s) + L_S(t_v - T_s) + P_s, \\ C_2 \frac{dT_2}{dt} &= L_{Dp}(T_p - T_2) + L_{Dz}(T_s - T_2) + L_{K2}(t_v - T_2) + P_2, \end{aligned} \right\}$$

gdzie pojemności poszczególnych mas cieplnych:  $C_{ML}$  – części połączeń czołowych uzwojenia,  $C_{MP}$  – uzwojeń w części żłobkowej,  $C_S$  – rdzenia induktora,  $C_2$  – aktywnej CzW;  $P_l$ ,  $P_p$ ,  $P_s$ ,  $P_2$  – odpowiednio straty mocy w częściach połączeń czołowych, uzwojeń w żłobkach, rdzeniu i CzW oraz  $t_v$  – temperatura powietrza.

Uwzględniając osobliwość SIL należy wziąć pod uwagę, że w różnorodnych stanach pracy rozkład średnich temperatur na długości silnika będzie niejednakowy i zjawisko „przenoszenia” masy ciepła - nagrzewanie się odcinków induktora i CzW - może okazać się istotnie nierównomierne. Dlatego do badań sprzężonych procesów

elektromechanicznych i ciepłych zastosowano metodę detalizowanych zastępczych schematów cieplnych (DZSC).

W charakterze elementarnych obszarów schematu cieplnego rozpatruje się induktor i CzW nie jako całość, ale jako elementarne obszary o równych długościach, otrzymane poprzez „przecięcia” SIL płaszczyznami prostopadłymi do jego osi wzdłużnej – rys. 2. Aktywny obszar SIL rozdzielono zatem na 4 elementarne obszary umownie nazwane detalizowanymi induktorami (DI), każdy o długości podziałki biegunowej  $\tau$  i podobnie „wyloty” CzW z prawej i lewej strony jako 2 identyczne obszary. W jednym z wariantów obliczeniowych CzW przyjęto nie 2 a 4 obszary. Pogrubionymi punktami na schemacie wyróżniono węzły z detalizowanymi masami cieplnymi, m.in.:  $M_{as}$  (rdzenia),  $M_{cs}$  (uzwojenia),  $M_{cr}$  (CzW) i  $M_{ar}$  (rdzenia CzW). Prostokątami oznaczono odpowiednie przewodności cieplne ( $\Lambda$ ) między węzłami a także pomiędzy węzłami i otoczeniem. Rozwiązanie to ma tę zaletę, że detalizowane obszary zawierają jednakową strukturę wewnętrzną i mają charakter powtarzalny.

Stopień detalizacji modelu zależy od charakteru rozpatrywanego zadania, za najbardziej racjonalne można uważać detalizację modelu induktora z krokiem równym wielkości podziałki biegunowej. Jest to uzasadnione potrzebą skrócenia czasu obliczeń oraz nierównomiernością prądów w gałęziach równoległych uzwojenia na różnych podziałkach biegunowych i różnej intensywności nagrzewania tych gałęzi.

Analizy przejściowych stanów cieplnych dokonano w oparciu o trzy modele matematyczne różniące się poziomem przyjętych uproszczeń. W modelu 1. CzW nie przekracza granic aktywnego obszaru pod induktorem, oddzielnie uwzględnia się tu masy: CzW, dwóch części uzwojenia - żłobkową i połączeń czołowych, oraz rdzenia induktora. W modelu 2. bierze się pod uwagę oddawanie ciepła przez aktywny obszar CzW do jego obszarów pasywnych - zwanych dalej „wylotami” - z lewej i prawej strony induktora (rys.2). Dla tego modelu wyłączniki „K” pozostają zamknięte -  $K=1$ .

Natomiast w modelu 3, w porównaniu do modelu 2, dodatkowo uwzględnia się ruch CzW. Pozwala on uwzględnić nierównomierność nagrzewania się silnika wzdłuż jego długości. Ruch CzW został uwzględniony w składnikach przewodności L2l z lewej i L2r z prawej strony, oznaczonych kolorem czerwonym na dolnej części rys. 1.

Przy braku oddawania ciepła z powierzchni [2, 6] można zapisać równanie różniczkowe przewodnictwa Fouriera-Kirchhoffa dla zagadnienia liniowego jednowymiarowego wzdłuż osi x:

$$(2) \quad \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c_p \cdot d}$$

gdzie:  $a = \frac{\lambda}{c_p \cdot d}$  - dyfuzja cieplna CzW,  $d$  – gęstość CzW,  $c_p$  - ciepło właściwe CzW,  $q_v$  -

jednostkowa moc źródła ciepła,  $v$  – prędkość CzW,  $T_i$  - średnia temperatura obszaru „i” o szerokości  $t_z$ , grubości  $\Delta$  i długości  $L_t$ .

Przechodząc do różnic skończonych o kroku  $t_z$ , z równania (2) otrzymujemy:

$$(3) \quad \frac{dT_i}{dt} = T_{i-1} \left[ \frac{a}{t_z^2} + \frac{v}{2t_z} \right] - \left[ \frac{2a}{t_z^2} \right] T_i + T_{i+1} \left[ \frac{a}{t_z^2} - \frac{v}{2t_z} \right] + v \frac{q_{vi}}{c_p d}$$

Uwzględniając natomiast oddawanie ciepła z powierzchni CzW równanie (2) możemy zapisać w postaci:

$$(4) \quad \frac{dT_i}{dt} = AT_{i-1} - BT_i + CT_{i+1} + D + q'_{vi}$$

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

$$\text{gdzie: } A = \frac{a}{t_z^2} + \frac{v}{2t_z}; q_{vi}' = \frac{q_{vi}}{c_p d}; B = \left( \frac{a}{t_z^2} + \frac{v}{2t_z} \right) + \left( \frac{a}{t_z^2} - \frac{v}{2t_z} \right) + \frac{\alpha}{c_p \cdot d \cdot \Delta};$$

$$C = \frac{a}{t_z^2} - \frac{v}{2t_z}; D = \frac{\alpha}{c_p \cdot d \cdot \Delta} \cdot T_c;$$

$\alpha$ - współczynnik oddawania ciepła;  
 $T_c$ - temperatura otoczenia.

Wyrażenie (4) możemy z kolei przekształcić do postaci (5), która odpowiada schematowi przedstawionemu na rys. 2:

$$(5) \quad \frac{dT_i}{dt} = (L_{i-1,i})(T_{i-1} - T_i) + (L_{i+1,i})(T_{i+1} - T_i) + (L_{i,c})(T_c - T_i) + q_{vi}'$$

Analizując wyrażenia, określające parametry przewodności CzW ( $L_{i-1,i} = A = L2l$ ,  $L_{i+1,i} = C = L2r$ ), można zauważyć, że przewodność metalu w kierunku ruchu zwiększa się wskutek przenoszenia ciepła przez przemieszczającą się masę.

Zaproponowana metoda DZSC zajmuje miejsce pośrednie pomiędzy metodą klasyczną a metodą polową. Stopień detalizacji w tej metodzie podyktowany jest wymogami zadania obliczeniowego i może być różny. Zwykle przyjmuje się go w odniesieniu do obwodów elektrycznych – do sekcji i fazy, elektromagnetycznych – do podziałki żłobkowej  $t_1$ , cieplnych – do podziałki żłobkowej  $t_1$ , podziałki biegunowej  $\tau$ , wielu podziałek biegunowych lub całkowitej długości induktora.

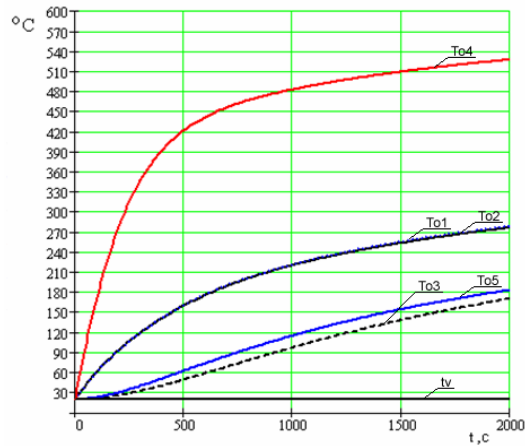
W większości przypadków cieplne stałe czasowe o wiele rzędów przewyższają stałe czasowe mechaniczne, które z kolei są dużo większe od stałych czasowych elektromagnetycznych. Ten fakt pozwala przy wspólnej analizie procesów elektromechanicznych [2, 8] i cieplnych [2, 6, 7] wykorzystać statyczne modele elektromagnetyczne i dynamiczne modele cieplne. W pracach [2, 7] zamieszczono szczegółowe dane dotyczące budowy modelu, przyjętych parametrów i obliczeń SIL typu SL-5-100 w środowisku Mathcad. Zaproponowaną metodykę sprawdzono eksperymentalnie [9, 10].

### **Wybrane rezultaty badań**

Interesujące wyniki badań otrzymujemy dla modelu 2, gdy uwzględnimy „wyloty” CzW z lewej i prawej strony o dwóch długościach  $\tau$ , oddające ciepło do powietrza. Wówczas krzywe nagrzewania przebiegają, tak jak pokazano na rys. 3. Porównując uzyskane rezultaty dla modelu 1, zauważyć można, iż części „wylotowe” CzW stanowią swego rodzaju „rurki” cieplne odprowadzające ciepło z obszaru aktywnego.

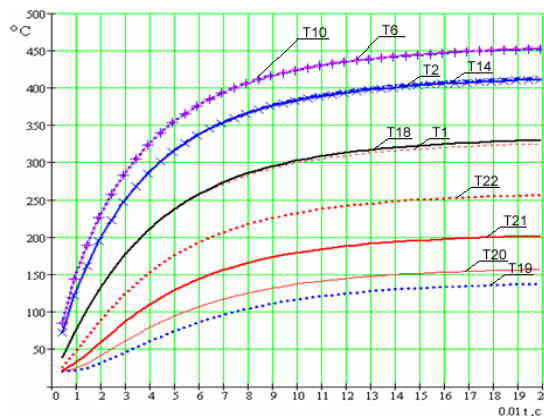
Jak widać temperatura CzW osiąga 530°C, uzwojenia 280°C, natomiast rdzeń 170°C. Uzyskane w wyniku obliczeń temperatury przekraczają dopuszczalne przez normy wartości. W związku z tym należy w modelu uwzględnić ruch CzW lub zapewnić odpowiednie systemy chłodzenia.

W dalszej części przedstawiono rezultaty badań w oparciu o 3 modele, z który najbardziej adekwatny okazał się model 3.



Rys. 3 Krzywe nagrzewania elementów SIL obliczone wg modelu 2.

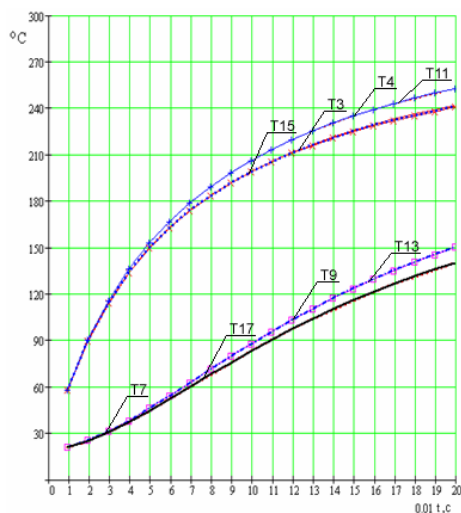
- $T_{01}$  - temperatura uzwojenia induktora w części żłobkowej,
- $T_{02}$  - temperatura połączeń czołowych,
- $T_{03}$  - temperatura rdzenia induktora,
- $T_{04}$  - temperatura aktywnej części CzW
- $T_{05}$  - temperatura izolacji



Rys. 4 Krzywe nagrzewania elementów CzW SIL obliczone wg modelu 3., gdzie temperatury oznaczono:

- T1 – wylot CzW 2 z lewej strony,
- T2 – CzW pod DI nr 1, T6 – CzW pod DI nr 2,
- T10 – CzW pod DI nr 3, T14 – CzW pod DI nr 4,
- T18 – wylot CzW 3 z prawej strony,
- T19 – wylot CzW 4 z prawej strony,
- T20 – „wylotu” CzW oddalonego o  $3\tau$  z lewej strony od SIL,
- T21 – „wylotu” CzW oddalonego o  $2\tau$  z lewej strony od SIL,
- T22 – wylot CzW 1 z lewej strony,

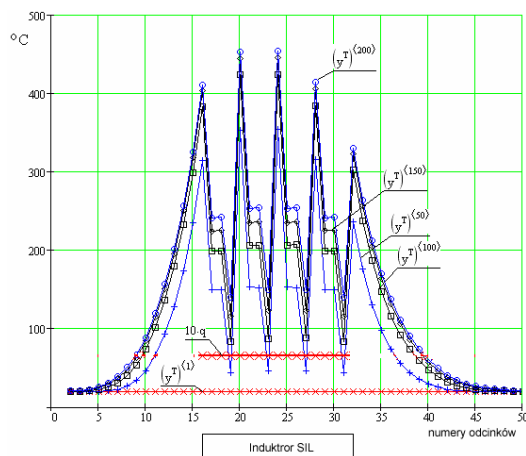
**VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010**



Rys. 5 Krzywe nagrzewania uzwojenia i rdzenia induktora SIL obliczone wg modelu 3., gdzie temperatury oznaczono:

- T3 – połączeń czołowych uzwojenia DI nr 1,
- T4 – uzwojenia w części żłbkowej DI nr 1,
- T7 – połączeń czołowych uzwojenia DI nr 2,
- T11 – połączeń czołowych uzwojenia DI nr 3,
- T15 – połączeń czołowych uzwojenia DI nr 4,
- T9 – rdzenia DI nr 1, T9 – rdzenia DI nr 2,
- T13 – rdzenia DI nr 3, T17 – rdzenia DI nr 4,

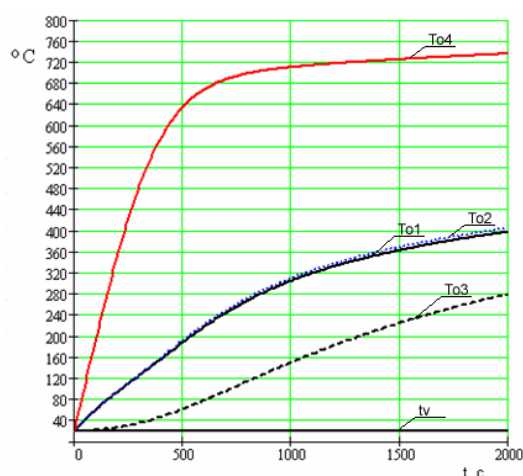
Na rys. 6 pokazano rozkład temperatur detalizowanych mas cieplnych CzW dla różnych momentów czasu.



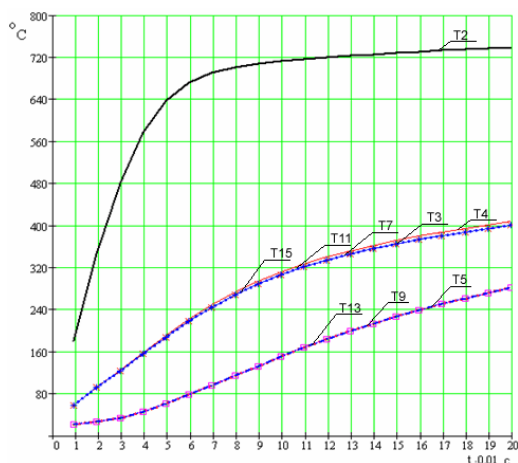
Rys. 6 Rozkład temperatur w poszczególnych odcinkach CzW obliczone wg modelu 2., 1 - początek nagrzewania i koniec - 200, q – jednostkowe straty w aktywnych odcinkach CzW.

Oznaczenia (1, 50, 100, 150, 200) pokazują ilość kroków w czasie (1 krok równy 10 s). Najbardziej nagrzane okazują się odcinki CzW w obszarze aktywnym (do 460°C), a jego skrajne obszary od 1 do 5 i od 45 do 50 posiadają temperaturę otaczającego środowiska. Uzwojenia w części żłobkowej i połączeń czołowych w 4 obszarach nagrzewają się praktycznie jednakowo - do 245°C, a magnetowód - do 125°C.

Dla oceny stopnia wpływu pasywnych „wylotów” CzW na stan cieplny elementów SIL w modelu matematycznym wprowadzono, jak wspomniano wyżej, współczynnik  $K$ , który uwzględnia go ( $K=1$ ) lub nie ( $K=0$ ). Jak wynika z rys. 7 i 8, pasywne „wyloty” posiadają temperaturę otaczającego środowiska, a temperatura w aktywnej części CzW wzrosła do 730°C, uzwojeń - do 400°C, natomiast rdzenia - do 270°C. Wyniki te praktycznie pokrywają się z danymi obliczonymi dla modelu 1, co z jednej strony potwierdza poprawność modelu pierwszego, a z drugiej – ilustruje zjawisko wpływu „wylotów” CzW na temperaturę w jego aktywnym obszarze.



Rys. 7 Krzywe nagrzewania elementów SIL obliczone eg modelu 1. (oznaczenia temperatur – jak na rys. 3)



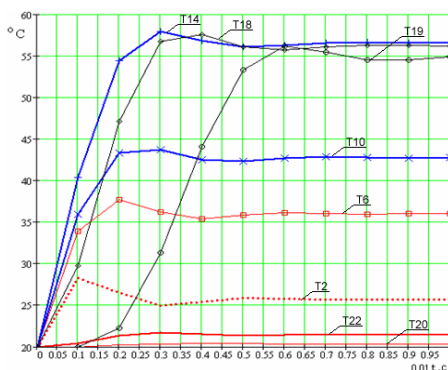
Rys.8 Krzywe nagrzewania elementów SIL obliczone wg modelu 3., podobnie jak na rys. 4 i 5, ale bez wzajemnego wpływu części aktywnej CzW i wylotów, gdzie temperatury oznaczono:



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

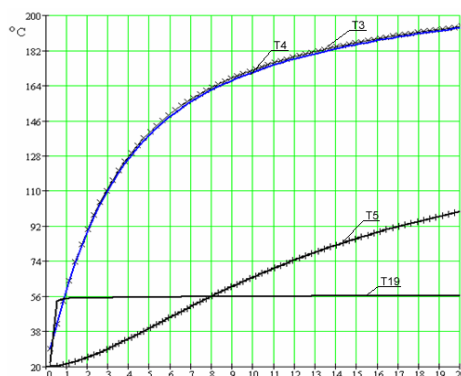
T2 – CzW pod DI nr 1  
 T3 – połączeń czołowych uzwojenia DI nr 1  
 T4 – uzwojenia w części żłbkowej DI nr 1  
 T7 – połączeń czołowych uzwojenia DI nr 2  
 T11 – połączeń czołowych uzwojenia DI nr 3  
 T15 – połączeń czołowych uzwojenia DI nr 4  
 T5 – rdzenia DI nr 1, T9 – rdzenia DI nr 2, T13 – rdzenia DI nr 3,

Na rys. 9. pokazano temperaturę odcinków CzW przy jej przemieszczaniu się z prędkością 0,01 m/s. Jak wynika z przytoczonych wykresów, temperatura obszarów CzW za granicami induktora w kierunku ruchu wzrasta prawie do 60°C, a w tym czasie jego obszary pod induktorem nagrzewają się słabo, dlatego że na zmianę stale podchodzą nienagrzane „wyloty” z lewej strony.



Rys.9 Krzywe nagrzewania elementów CzW SIL obliczone wg modelu 3., analogicznie jak na rys. 4, dla przypadku CzW poruszającej się z prędkością 0,01m/s, gdzie temperatury oznaczono:

T2 – CzW pod DI nr 1, T6 – CzW pod DI nr 2,  
 T10 – CzW pod DI nr 3, T14 – CzW pod DI nr 4,  
 T18 –wylotu z prawej strony - CzW 3  
 T19 –wylotu z prawej strony - CzW 4  
 T20 – „wylotu” CzW oddalonego o 3τ z lewej strony od SIL  
 T22 – wylotu z lewej strony - CzW 1



Rys.10 Krzywe nagrzewania uzwojenia i rdzenia induktora SIL obliczone wg modelu 3., podobnie jak na rys. 5, dla przypadku CzW poruszającego się z prędkością 0,01m/s,

gdzie temp. oznaczono:

T3 – połączeń czołowych uzwojenia DI nr 1

T4 – uzwojenia w części żłobkowej DI nr 1

T5 – rdzenia DI nr 1, T19 – wylotu z prawej strony - CzW 4

Odwrotnie jest w przypadku uzwojenia induktora, które nagrzewa się do 190°C, będąc najbardziej nagrzanym elementem SIL. Przy tym rdzeń nagrzewa się tylko do 100°C. Przemieszczająca się CzW jest swego rodzaju elementem wiodącym „wynoszącym” ciepło z obszaru aktywnego do prawej strefy granicznej. Te osobliwości najbardziej dokładnie demonstrują krzywe nagrzewania przedstawione na rys. 10.

Rezultaty badań stanu pracy SIL były wykorzystywane przy projektowaniu systemów transportowych z liniowymi napędami

### Podsumowanie

Zaproponowana metodyka i modele do badań procesów cieplnych SIL przy wykorzystaniu metody DZSC i łącznym rozpatrywaniu procesów elektromagnetycznych, elektromechanicznych i cieplnych pozwala - przy uwzględnieniu prędkości CzW SIL i zadanej dokładności obliczeń - zastosować statyczne modele elektromagnetyczne i dynamiczne modele cieplne. Daje to możliwość określenia temperatury w jego poszczególnych elementach konstrukcyjnych oraz uniknięcia przyjmowania zbyt daleko idących uproszczeń, wpływających na zniekształcenie rzeczywistego obrazu stanu cieplnego silnika. Przedstawiona w pracy metodyka i modele są ogólne i uniwersalne oraz dają rezultaty wystarczająco dokładne w porównaniu z wynikami badań eksperymentalnych.

P.S.

Autor serdecznie dziękuje za owocną współpracę Kolegom z Rosji i Ukrainy, a szczególnie prof. Fiodorowi Sarapulowowi i prof. Stanisławowi Karasiowi.

### LITERATURA

- [1] Gieras J.F., *Linear Induction drives*. Oxford University Press, Oxford 1994,
- [2] Sarapulov F.N., Sarapulov S.F., Szymczak P. *Matematyczne modeli liniowych indukcyjnych maszyn na asnowie schem zamieszczenia*, Izd. 2, GOU VPO „Ugtu-UPI”, Jekaterinburg 2005,
- [3] Turowski J. *Podstawy mechatroniki*, wyd. Wysz. Szk. Hum.-Ek. w Łodzi, Łódź 2008.
- [4] Bula K. *Analiza niestacjonarnych stanów termicznych silników liniowych płaskich metodą schematów cieplnych*. Archiwum Elektrotechniki Tom XLI, z. 1-4, s. 99-116, 1992
- [5] Graczyk M., Mrugała B. *Chłodzenie silników liniowych płaskich typu SL-5*. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe. BOBRME Katowice. 1976. Nr 24, s. 69-72.
- [6] Sarapulov F.N., Sarapulov S.F., Karaś S.V., Szymczak P., *Analiz tiepłowych processov v liniejnomy asinchronnom dwigatieli. Mat. 5.konf. ELMASZ-2004, Perspektywy i tendencii razwitia elektrotechniczeskowo oborudowania, tom 1, Moskwa, 2004, s. 128-132*
- [7] Sarapulov F.N., Karaś S.V., Czekavski G.S., Szymczak P., *LAD i ich tiepłowyje modeli, sostavlennyje s ucetom asobiennostej konstrukcji i rezima raboty*. Sb. naucz. tr. UkrNIIVE, „Vzryvo zaščičennoe elektrooborudowanie”, OOO „Jugo-Vostock, Ltd” Donieck 2005, s. 167-181,
- [8] Szymczak P., *Dinamiczeskaja model i strukturalnaja schiema liniejnomy asinchronnomy dwigatiela*. Elektriczesstwo, 2003 Nr 11, s. 56-63
- [9] Mukosiej J., Zapaśnik R., *Badania cieplne i wentylacyjne maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa, 1964
- [10] Ivanienko V.S., Karaś S.V., Burkovski A.M., *Vybor sposoba ochłażdienia, tiepłowyj razcziot i eksperymetalna prowierka induktora niskoskorostnomy LAD*. Sb. naucz. tr. VNIIVE, Donieck, 1985, s. 96-102.

**Autorzy:** dr inż. Piotr Szymczak, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Elektrotechniki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: piotr.szymczak@zut.edu.pl