

## Analiza cieplna napędu z liniowymi silnikami indukcyjnymi o regulowanej częstotliwości

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono analizę procesów cieplnych w silniku indukcyjnym liniowym o regulowanej częstotliwości z wykorzystaniem metody polowej i detalizowanych zastępczych schematów cieplnych. Pokazano wybrane rezultaty badań cieplnych w stanie ustalonym z magnetowodem klasycznym i proszkowym oraz przytoczono krzywe nagrzewania podstawowych elementów konstrukcyjnych silnika liniowego.

**Abstract.** The paper presents the thermal analysis of inverter-fed LIM drive carried out on the base of a field method and detailed thermal equivalent circuits. The thermal field distribution picture of the LIM has been determined for both constructions: the laminated and the powder structured primary as well. In result of transient analysis the curves of temperature distribution in the main construction parts of LIM have been plotted. The evidence showed a good conformity with the results of the theoretical analysis. *(Thermal analysis of frequency controlled drive with the linear induction motor)*

**Słowa kluczowe:** silnik indukcyjny liniowy, detalizowane zastępcze schematy cieplne, rozkład temperatury, analiza termiczna,

**Keywords:** linear induction motor, detailed thermal equivalent circuit, thermal decompositions, thermal analysis,

### Wstęp

Projektowanie napędu elektrycznego wymaga analizy i oceny stopnia spełnienia zadanych wymogów. Wśród nich szczególnie ważne są zagadnienia termiczne [1-8]. Analiza zjawisk cieplnych pozwala na wyznaczenie rozkładu pola temperatury i przyczynia się tym samym do lepszego wykorzystania materiałów konstrukcyjnych silnika. Należy zauważyć, że w silnikach indukcyjnych liniowych (SIL) występują zjawiska osobliwe, które powodują inną specyfikę procesu nagrzewania niż w analogicznych maszynach klasycznych, są to: niemożność samo wentylacji, zwłaszcza przy niedużych prędkościach; występowanie dodatkowych strat wskutek niesymetrii prądów fazowych i efektów końcowych; niejednakowe warunki chłodzenia uzwojeń i odcinków rdzenia z powodu otwartego obwodu magnetycznego oraz stałe opuszczanie przez część wtórną (CzW) aktywnego obszaru pod induktorem [3, 4, 7, 9].

Projektant napędu z SIL w wielu przypadkach powinien umieć ocenić wzajemny wpływ parametrów konstrukcyjnych na prędkość narastania temperatury poszczególnych elementów SIL, a zwłaszcza CzW, uzwojeń oraz rdzenia. Natomiast przy eksploatacji SIL należy szczególną uwagę zwrócić na przyrosty temperatury w różnych stanach pracy, aby nie dopuścić do przekroczenia temperatur dopuszczalnych dla danej klasy izolacji. Celem pracy jest analiza procesów cieplnych SIL w stanach ustalonych i przejściowych.

### Metody analizy SIL

W pierwszym etapie badań procesów cieplnych w stanach ustalonych SIL posłużono się metodą polową. Badania symulacyjne procesów cieplnych prowadzono w

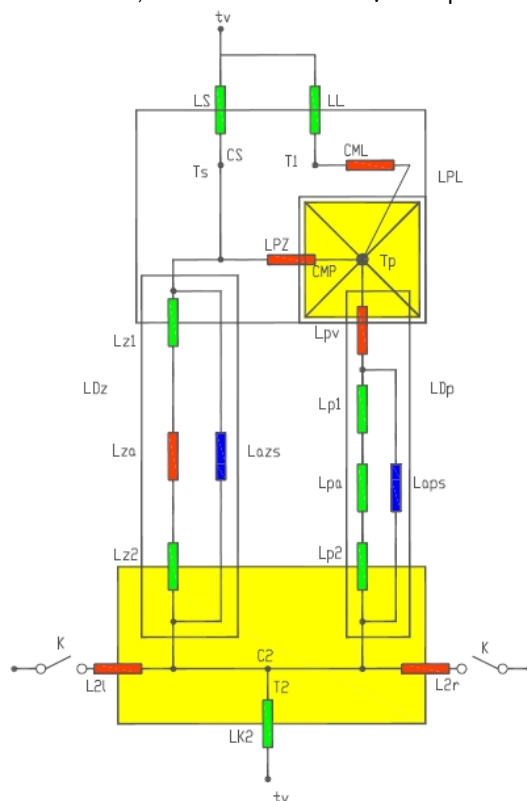
środowisku QuickField. Obejmowały one wyznaczenie pól temperatury i przebiegów temperatury silnika liniowego z magnetowodem klasycznym - wykonanym z blachy elektrotechnicznej oraz prozkowym typu: STX H1 SMC firmy SIMTEX [10].

W drugim etapie, przy badaniu procesów cieplnych przejściowych wykorzystano metodę zastępczych schematów cieplnych, wprowadzoną przez R. Soderberga w 1931 roku, i rozwiniętą dalej przez zespół naukowy pod kierunkiem prof. F.N. Sarapułova [11]. Metoda ta nazywana w skrócie DZSC pozwala uwzględnić osobliwości SIL i badać sprzężone procesy elektromechaniczne i cieplne.

Układ równań różniczkowych równowagi cieplnej zapisujemy w postaci [7, 11]:

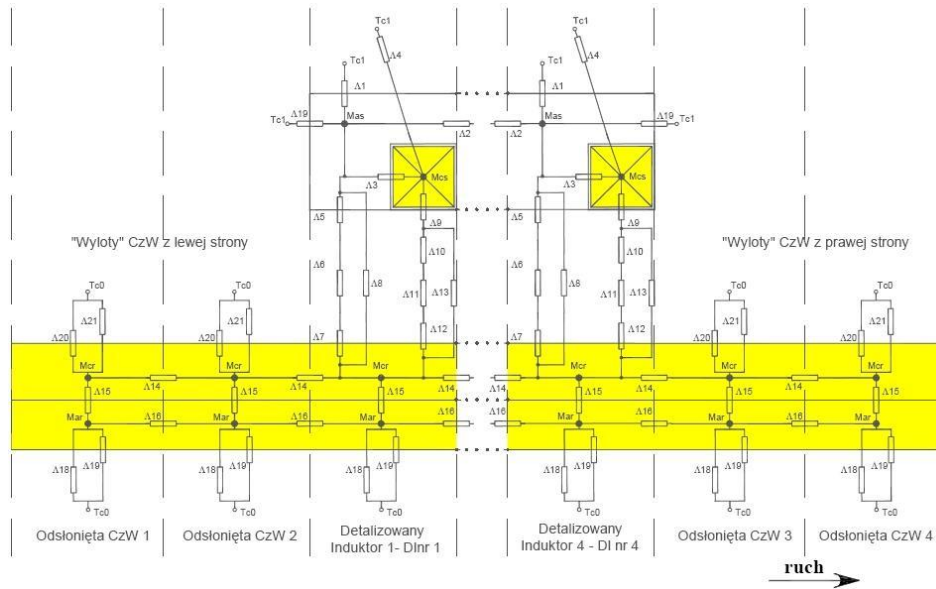
$$(1) \quad \left. \begin{aligned} C_{ML} \frac{dT_1}{dt} &= L_{PL}(T_p - T_1) + L_L(t_v - T_1) + P_l, \\ C_{MP} \frac{dT_n}{dt} &= L_{PL}(T_1 - T_p) + L_{PZ}(T_s - T_p) + L_{Dp}(T_2 - T_p) + P_p, \\ C_S \frac{dT_s}{dt} &= L_{PZ}(T_p - T_s) + L_{Dz}(T_2 - T_s) + L_S(t_v - T_s) + P_s, \\ C_2 \frac{dT_2}{dt}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

gdzie, pojemności poszczególnych mas cieplnych opisano:  $C_{ML}$  – 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.



Rys. 1. Detalizowany zastępczy schemat cieplny SIL do - 1t

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



Rys. 2. Detalizowany zastępczy schemat cieplny czterobiegowego SIL

Przy badaniach symulacyjnych niestacjonarnych stanów cieplnych SIL niezwykle ważnym jest przyjęcie odpowiedniej detalizacji modelu [7, 11] – rys. 1 i rys. 2. W wielu przypadkach wystarcza zastosować „powiększone” schematy cieplne. Ważne przy opracowaniu modeli cieplnych SIL jest rozstrzygnięcie czy uwzględnić wpływ obszarów CzW wystających z lewej i prawej strony SIL poza granice induktora – nazywanych wylotami. Ogólnie stopień detalizacji może być różny, z reguły dla schematów elektrycznych ogranicza się – do sekcji i fazy, elektromagnetycznych – do podziałki żłobkowej, a cieplnych – do podziałki żłobkowej  $t_l$  lub podziałki biegunowej  $\tau$ , wielu podziałek biegunowych a nawet – całkowitej długości induktora. A zatem skala detalizacji podyktowana jest wymogami zadania obliczeniowego. Np. jeżeli przy dużej prędkości CzW do obliczeń temperatury odcinków wystarcza detalizacja z krokiem o jedną lub wiele podziałek biegunowych, to przy małej prędkości należy rozpatrywać obszar z detalizacją do jednej podziałki żłobkowej.

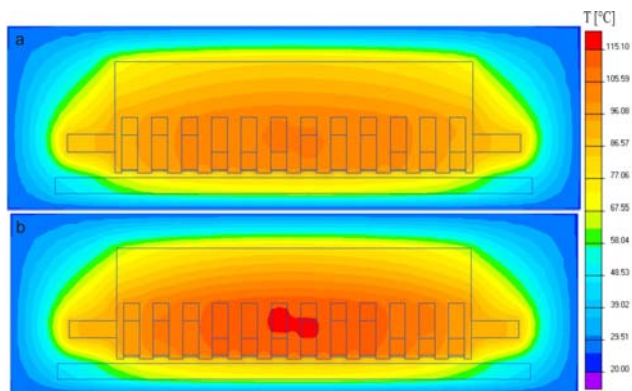
### Wyniki badań w stanach ustalonych

Regulacja częstotliwości powoduje zmiany strat w żelazie, zarówno histerezowych jak i wirowych. Korzystając z dostępnej literatury [12, 13] oszacowano dla warunków znamionowych straty w żelazie w odniesieniu do strat całkowitych  $\Delta P_{Fe\%}=3,4\%$ , i strat w uzwojeniach  $\gamma_n=3,5\%$ . Następnie określono wielkość tych strat przy wzroście częstotliwości, dla przykładu przy  $f=100$  Hz straty te wynoszą odpowiednio  $\Delta P_{Fe\%,100}=7,8\%$ ,  $\gamma_{n,100}=8,4\%$ .

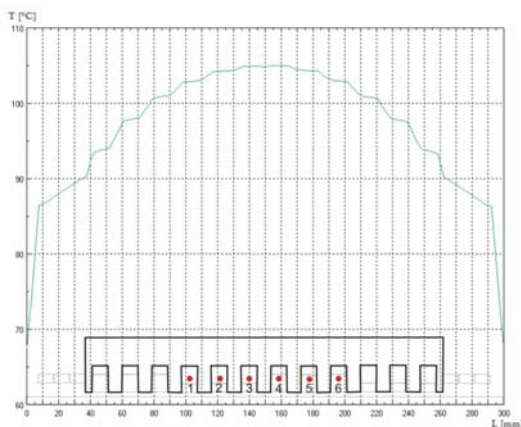
Na podstawie badań, wykonanych w programie QuickField, uzyskano rozkład pola temperatury - rys. 3. Jak widać, najwyższe temperatury zaobserwować można w połowie wysokości cewek o dwa razy większej liczbie zezwojów (rys. 3b).

Można zauważyć, że wymiana ciepła w SIL z magnetowodem klasycznym (zblachowanym) jest korzystniejsza. Mniejszy współczynnik przewodności cieplnej SMC –  $\lambda_{SMC}=20$  W/°Km<sup>2</sup> [10], w stosunku do magnetowodu klasycznego o  $\lambda_{Fe}=43$  W/°Km<sup>2</sup>

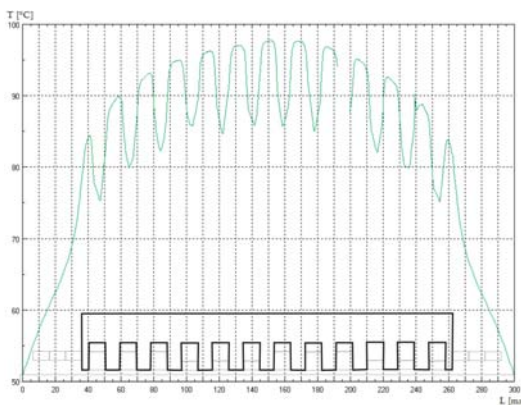
powoduje utrudniony odpływ ciepła z uzwojeń. W wyniku tego temperatura najbardziej nagranych cewek środkowych (3,4) wzrasta od 105°C do 115°C (rys. 3 i rys. 4).



Rys. 3. Rozkład temperatury w SIL typu SL-270 z magnetowodem klasycznym (a), oraz wykonanym w technologii SMC (b).



Rys. 4. Rozkład temperatury induktora SIL na wysokości środka żłobków w wykonaniu klasycznym z oznaczonymi punktami obliczeniowymi.



Rys.5. Rozkład temperatury na wysokości zębów induktora SIL w wykonaniu klasycznym

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

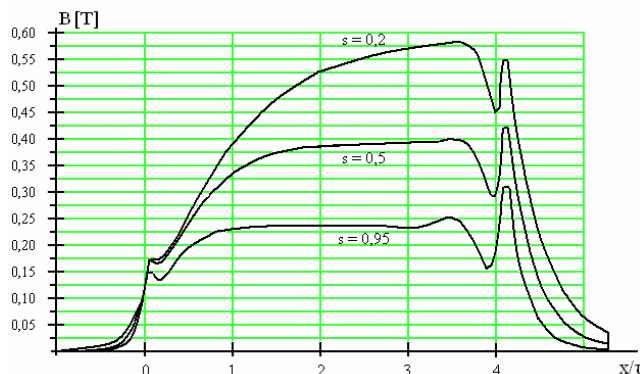
Wyniki badań symulacyjnych porównano z wynikami badań eksperymentalnych zamieszczonych w literaturze [14] – tab. 1. Stwierdzono, wyjątkowo dobrą zbieżność uzyskanych wyników.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań symulacyjnych z wynikami eksperymentalnymi

Wyniki eksperymentalne [14]		Wyniki badań symulacyjnych		Błąd $\delta$
Numery Termopar	Temp. zmierzone eksperymentalnie	Numer punktu	Temp. punktu	
4	107,0	1	103,0	+4,0
5	102,0	2	104,5	-2,5
6	107,0	3	105,0	+2,0
7	108,5	4	105,0	+3,5
8	97,0	5	104,5	-7,5
9	109,0	6	103,0	+6,0

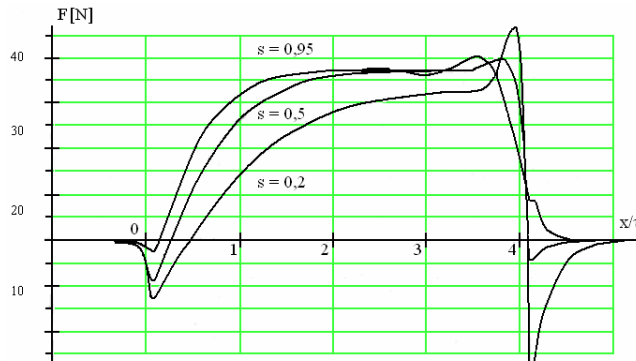
### Wybrane wyniki badań SIL w stanach niestacjonarnych

Dla zilustrowania wyników badań opartych o metodę DZSC wybrano przykłady pokazujące niekorzystne zjawiska cieplne. Należy podkreślić, że pod względem budowy i zjawisk fizycznych silniki liniowe odróżniają się od silników wirujących skończoną długością obwodów magnetycznych w kierunku ruchu pola.



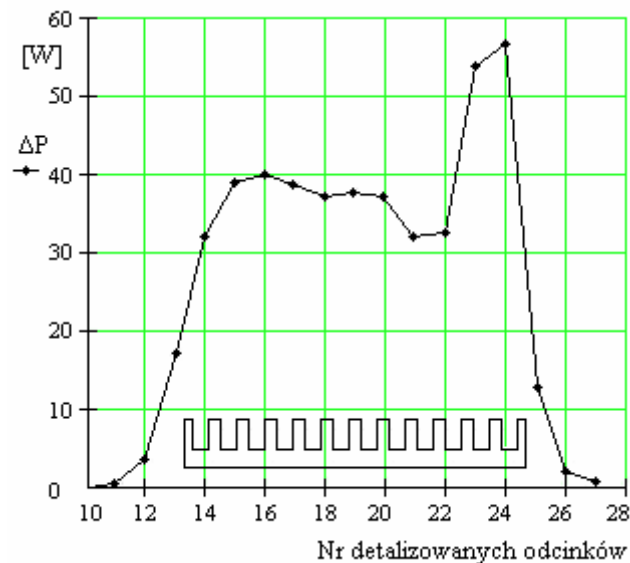
Rys. 6. Rozkład pola magnetycznego w szczelinie powietrznej  $B=f(x/\tau)$  dla CzW z aluminium o grubości  $d=2\text{mm}$

Właśnie otwarty obwód magnetyczny powoduje powstawanie zjawisk z natury pasożytniczych [3, 4, 9, 11, 15, 16], do których zalicza się m.in. nierównomierny, zależny od prędkości  $v_x$  rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej (rys. 6) oraz pojawienie się pasożytniczych sił hamujących, zwłaszcza na pierwszej podziałce biegunowej i poza induktorem na wyjściowym fragmencie CzW– rys. 7.



Rys. 7. Rozkład jednostkowej siły ciągu  $F$  wzdłuż współrzędnej  $x$  dla różnych poślizgów

Na rys.8 przedstawiono rozkład strat w nieruchomej CzW wzdłuż induktora SIL typu SL-5-100, gdzie za jednostkę długości przyjęto odcinek równy podziałce żłobkowej  $t_1$ . Całkowite straty w CzW określa się poprzez zsumowanie strat na jego elementarnych odcinkach. Często wystarcza przyjąć za podstawę całkowite straty, nie uwzględniając przy tym nierównomierności ich rozkładu wzdłuż induktora.



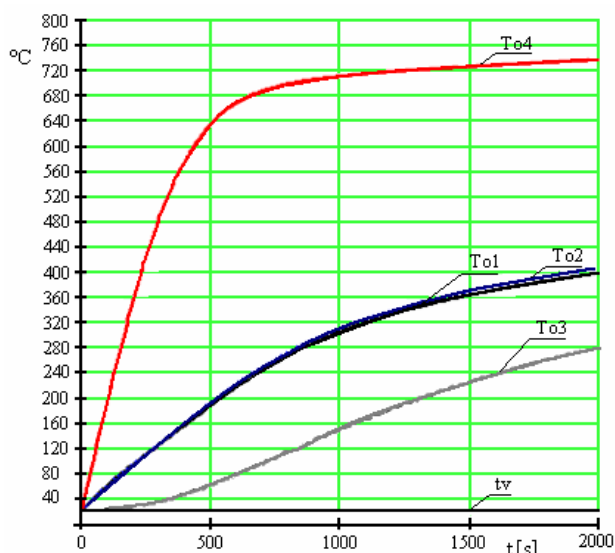
Rys. 8. Rozkład strat CzW wzdłuż induktora SIL typu SL-5-100

Na rys. 9 przytoczono krzywe niestacjonarnego procesu nagrzewania się elementów składowych SIL przy nieruchomej CzW i temperaturze otoczenia  $t_v = 35^\circ$ . Z rys. 8 wynika, że obszar CzW pod induktorem ( $T_{o4}$ ) nagrzewa się do temperatury powyżej  $700^\circ$ , uzwojenia w części żłobkowej i połączeń czołowych ( $T_{o1}$  i  $T_{o2}$ ) – do  $400^\circ\text{C}$ , natomiast rdzeń ( $T_{o3}$ ) – do  $280^\circ\text{C}$ . Taka wartość maksymalna temperatury uzwojeń jest niedopuszczalna nawet dla maszyny elektrycznej wykonanej w klasie izolacji H ( $195^\circ\text{C}$ ) i konwencjonalnym układem chłodzenia.

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

Dokładniejsze wyniki badań otrzymujemy, gdy uwzględnimy „wyloty” CzW z lewej i prawej strony SIL oddające ciepło do powietrza. Jak pokazały wyniki badań, zamieszczone w pracy [7, 11], krzywe nagrzewania zmieniają się i temperatura znacznie opada. Na przykład, temperatura CzW zmniejsza się do 530 °C, uzwojeń induktora w części żłobkowej i połączeń czołowych do 280 °C, a rdzenia induktora – do 170 °C. Wyjaśnić to można tym, że części „wylotowe” stanowią swego rodzaju „rurki” cieplne odprowadzające ciepło z aktywnej części bieźnika.

Procesy cieplne w liniowych maszynach elektrycznych rzadko są przedmiotem badań i brak w literaturze rekomendacji do ich projektowania i eksploatacji. Stąd przypadki występowania znaczących przyrostów temperatur w różnych elementach konstrukcyjnych SIL, powodujących nadmierne naprężenia mechaniczne, a niekiedy deformację CzW i w konsekwencji – uszkodzenia układu napędowego.



Rysunek 9. Krzywe procesu nagrzewania się podstawowych elementów SIL: CzW –  $T_{o4}$ , uzwojenia ( $T_{o1}$  i  $T_{o2}$ ) i rdzenia ( $T_{o3}$ ).

### Podsumowanie

Do oceny stanu termicznego napędu z silnikami indukcyjnymi liniowymi można z powodzeniem stosować zarówno metody polowe, jak i detalizowanych zastępczych schematów cieplnych, które wzajemnie się uzupełniają. Metoda polowa pozwala wyodrębnić najgorętsze punkty lub obszary oraz rozkłady temperatur. Natomiast metoda DZSC umożliwi analizę procesów w stanach ustalonych i przejściowych, a także daje możliwość obliczania charakterystyk niestacjonarnego nagrzewania się części składowych SIL.

Porównując rezultaty badań magnetowodów klasycznych i proszkowych można stwierdzić, że w większym stopniu nagrzewają się uzwojenia w magnetowodzie proszkowym, co wyjaśnić można dwukrotnie mniejszą wartością współczynnika przewodności cieplnej materiału proszkowego –  $\lambda_{smc}=20 \text{ W/}^\circ\text{K}\cdot\text{m}^2$  przy  $\lambda_{Fe}=43 \text{ W/}^\circ\text{K}\cdot\text{m}^2$ .

LITERATURA:

- [1] Bula K. *Analiza niestacjonarnych stanów termicznych silników liniowych płaskich metodą schematów cieplnych*. Arch. Elektrotechniki Tom XLI, z. 1-4, s. 99-116, 1992.
- [2] Bula K. *Identyfikacja stałych parametrów termicznych w schemacie cieplnym silnika liniowego płaskiego*. Z. Prob. Politechniki Rzeszowskiej, Nr 146, Elektrotechnika z.18 1996, s. 5-19.
- [3] Gieras J.: *Silniki indukcyjne liniowe*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa, 1990.
- [4] Gieras J.F., *Linear Induction drives*. Oxford University Press, Oxford 1994,
- [5] Mukosiej J., Zapaśnik R., *Badania cieplne i wentylacyjne maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa, 1964.
- [6] Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V. *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons Ltd. 2008 Chichester, United Kingdom
- [7] Szymczak P. *Analiza stanów cieplnych niestacjonarnych w silnikach indukcyjnych liniowych*. Przegląd Elektrotechniczny. (w druku)
- [8] Turowski J. *Podstawy mechatroniki*. Wyd. Wyż. Szk. Hum.-Ekon. W Łodzi. Łódź 2008.
- [9] Afonin A. Szymczak P. *Mechatronika, Wyd. Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Seria Tempus WE PS Szczecin 2001*.
- [10] Yiping Dou, Youguang Gou, Jianguo Zhu, *Investigation of motor topologies for SMC application*. ICEMS, Issue, 8-11 09 2007, pp: 695-698.
- [11] Sarapulov F.N., Sarapulov S.F., Szymczak P. *Matematyczne modele liniowych indukcyjnych maszyn na asnowie schem zamieszczenia*, Izd. 2, GOU VPO „UGTU-UPI”, Jekaterinburg 2005,
- [12] Jezierski E. *Transformatory Podstawy teoretyczne*. WNT Warszawa 1965.
- [13] Turowski J. Wyd. 2, *Elektrodynamika techniczna*, WNT Warszawa 1993
- [14] Graczyk M., Mrugała B. *Chłodzenie silników liniowych płaskich typu SL-5*. Maszyny Elektryczne – Z. Prob. BOBRME, Katowice. 1976. Nr 24, s. 69-72.
- [15] Szymczak P., *Dinamiczeskaja model i strukturalnaja schiema linijnogo asynchronnogo dwigatiela*. Elektrichestvo, 2003 Nr 11, s. 56-63.
- [16] Szymczak P. *Modeling and transient analysis of the linear induction motor by detailed structural schemes*. Przegląd Elektrotechniczny 2007, nr 11, s. 128-130.

**Autorzy:** Zakład Maszyn i Napędów Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: [piotr.szymczak@zut.edu.pl](mailto:piotr.szymczak@zut.edu.pl)

<sup>2</sup> Akademiczne Koło SEP przy Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: [Krystian.czyzewski@gmail.com](mailto:Krystian.czyzewski@gmail.com), [ghostsmail@wp.pl](mailto:ghostsmail@wp.pl)