

Sebastian Wiszniewski

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych

WPLYW PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH LINIOWEGO SILNIKA TUBOWEGO INDUKCYJNEGO NA WYBRANE CHARAKTERYSTYKI EKSPLOATACYJNE

INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS OF A LINEAR TUBULAR INDUCTION MOTOR OF SELECTED OPERATING CHARACTERISTICS

Abstract: In present time the increasing use of electrical linear tubular motors, both induction and synchronous types takes place. With the growing interest in that motor based drives the research activity on the improvement of their construction continues to increase. Based on the results of analysis the influence of linear tubular induction motor parameters on the basic mechanic and energy performances is shown. It is proved the proper selection of the motor dimensions has a significant impact on its performances. In the paper the results of computer simulation of thermal phenomena in the inductor area are represented as well.

1. Wstęp

Ze względu na korzystny stosunek siły ciągu do masy oraz niewielkie pole rozproszenia, liniowe silniki tubowe indukcyjne (LSTI) znajdują coraz większą popularność wśród wielu typów napędów liniowych [1, 2]. Umożliwiają one budowę wysoko dynamicznych układów napędów różnej mocy, charakteryzują się szerokim zakresem prędkości ruchu induktora lub części wtórnej oraz zróżnicowanymi wartościami sił pociągowych. W przyszłości z powodzeniem mogą zastąpić liniowe napędy hydrauliczne i pneumatyczne w wielu aplikacjach.

Maszyny elektryczne liniowe są przetwornikami elektromechanicznymi, w których pobrana energia elektryczna przetwarzana jest na energię mechaniczną ruchu postępowego bez pośrednictwa mechanizmów dodatkowych tj. korbowody czy przekładnie. Obok wielu zalet liniowe silniki tubowe indukcyjne, posiadają także niedostatki, do których zaliczyć można problem wytwarzanego ciepła, a także ułożyskowania części wtórnej [1, 2, 3].

Współczesne wymagania stawiane liniowym napędom z silnikami tubowymi indukcyjnymi 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 prototypu oraz wdrożenia silnika [4].

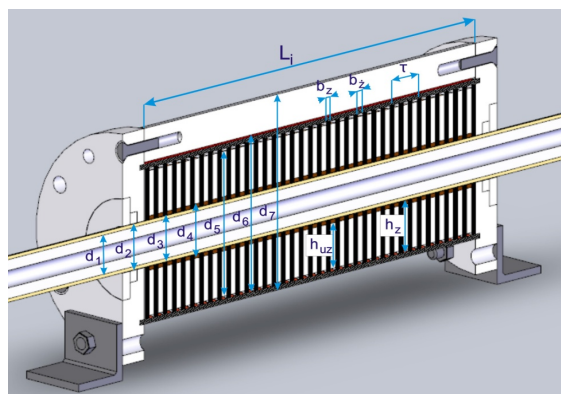
Proces ten znacząco się skraca, kiedy dysponujemy odpowiednim algorytmem oraz rekomendacjami dla wyboru podstawowych parametrów LSTI [4].

2. Dobór rozmiarów LSTI

Przy projektowaniu silników celowe jest wykorzystanie uproszczonych metod obliczeń optymalizacyjnych z ograniczeniem liczby parametrów zmiennych. Przy obliczeniach podstawowych parametrów silnika, proponowana funkcja celu ma postać [4]:

$$F_c = w_1 C_w^* + w_2 \eta^* + w_3 F_e^* \quad (1)$$

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



Rys. 1. Schemat konstrukcyjny LSTI

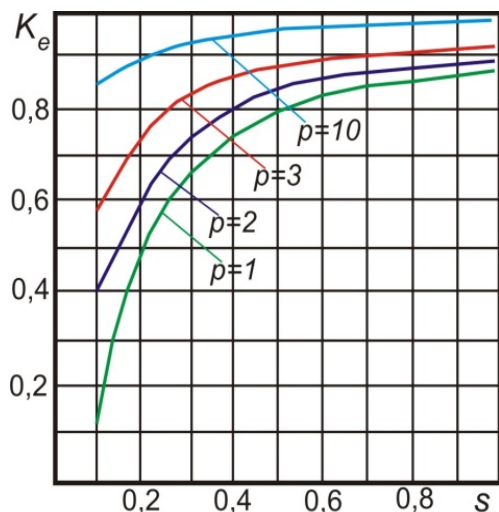
W procesie tym należy również uwzględnić wpływ zmiany parametrów konstrukcyjnych LSTI tj. szczelina powietrzna – σ , podziałka biegunowa – τ , liczba biegunów – $2p$, grubość części wtórnej – d , oporność części wtórnej – ρ

oraz szerokość zęba – b_z) na charakterystyki eksploatacyjne (prądu I , siły ciągu F i prędkości v); oraz wskaźniki energetyczne (współczynnik mocy $\cos\varphi$ i sprawność η).

Na rys. 1. pokazano jeden ze schematów konstrukcyjnych LSTI wykorzystany w obliczeniach. W pierwszym etapie projektowania należy określić rozmiary główne, t.j. wewnętrzną średnicę induktora d_3 oraz jego aktywną długość L_i . Z porównania obliczeniowych mocy wyrażonych w funkcji parametrów „wewnętrznych” oraz „zewnętrznych” parametrów znamionowych otrzymujemy równanie opisujące wewnętrzną średnicę induktora d_3 :

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

W powyższym równaniu uwzględniono wpływ podłużnego efektu końcowego K_e na wartość siły ciągu F [4]. Rys. 2 przedstawia jego zmianę w funkcji liczby par biegunów „ p ” i poślizgu „ s ”.



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

Współczynniki równania (2): α_δ , K_E , K_f , K_{ws1} , K_e , K_η i $\cos\varphi$ można uznać za niezmiennie w określonych przedziałach, co pozwala uzależnić wymiary LSTI głównie od obciążeń elektromagnetycznych.

Po wyznaczeniu d_3 oraz biorąc pod uwagę wymogi konstrukcyjne napędu z LSTI: znamionową siłę ciągu F_N odpowiadającą maksymalnej statycznej oporności, założoną długość ruchu części wtórnej oraz uwzględniając parametr smukłości maszyny w granicach ($\lambda = 4 \div 8$), otrzymujemy drugi podstawowy parametr konstrukcyjny – aktywną długość induktora:

$$L_i = \lambda d_3 \quad (3)$$

Znając podstawowe wymiary geometryczne projektowanego LSTI przystępuje się do obliczeń geometrii zębów i żłobków induktora. Wielkość podziałki biegunowej τ (4) oblicza się z warunków otrzymania maksymalnej prędkości części wtórnej przy poślizgu $s_{min}=0,3$.

$$\tau = \frac{v_N}{2f_1(1-s_{min})} \quad (4)$$

Zwiększenie podziałki biegunowej powoduje wzrost grubości jarzma magnetowodu oraz większą wartość współczynnika ε , natomiast jego zmniejszenie powoduje konieczność zastosowania większej ilości biegunów.

W kolejnym kroku określa się liczbę par biegunów silnika p :

$$p = \frac{L_i}{2\tau} \quad (5)$$

Większa ilość biegunów zmniejsza występowanie zjawisk efektów końcowych, niekorzystny wzrost reaktancji rozproszenia od strumieni części wtórnej występuje przy małej ilości biegunów.

Wielkość szczeliny powietrznej σ wyznacza się z równania:

$$\sigma = \frac{d_3 - d_2}{2} \quad (6)$$

Duża wartość szczeliny wymaga dużego prądu magnesującego i prowadzi do zmniejszenia współczynnika mocy $\cos\varphi$. Wraz ze zwiększeniem szczeliny powietrznej wzrastają straty, a siła ciągu i sprawność maleją.

Szerokość zęba b_z wybiera się w oparciu o rodzaj stali elektrotechnicznej i maksymalną dopuszczalną indukcję. Zmniejszenie szerokości zęba powoduje wzrost siły ciągu F i sprawności η .

W kolejnym etapie przystępuje się do obliczeń parametrów uzwojeń induktora. Liczbę zwojów fazy:

$$W_\phi = \frac{K_E U_N}{4K_B f_1 \phi_\delta} \quad (7)$$

gdzie: $\phi_\delta = \alpha_\delta \tau \pi d_3 B_\delta$.

Ogólna liczba cewek TSIL:

$$N_K = 2pm_1 \quad (8)$$

Liczba zwojów w cewce:

$$W_K = \frac{6W_\phi}{N_K} \quad (9)$$

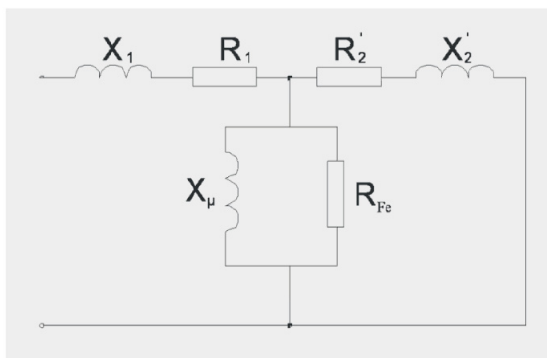
Prąd fazy induktora:

$$I_1 = \frac{A \tau_z}{W_K} \quad (10)$$

Przy obliczeniach grubości części wtórnej d należy zwrócić uwagę na fakt, iż jej zwiększenie powoduje wzrost reaktancji rozproszenia.

3. Wyznaczenie parametrów schematu zastępczego

Na potrzeby badawcze LSTI zastosowano schemat zastępczy maszyny indukcyjnej przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Schemat zastępczy LSTI

Parametry schematu zastępczego (rys. 3) obliczono w oparciu o dane konstrukcyjne LSTI wykorzystując zależności (11 – 14).

Rezystancję fazy uzwojenia induktora określa wzór:

$$R_1 = \frac{N_K}{3} \frac{1}{\gamma_{cu}} \frac{l_K}{q_m} \quad (11)$$

gdzie:

$\gamma_{cu} = 40,7 \cdot 10^6$ [1/Ω·m] - oporność właściwa przy temperaturze $t = 75^\circ\text{C}$.

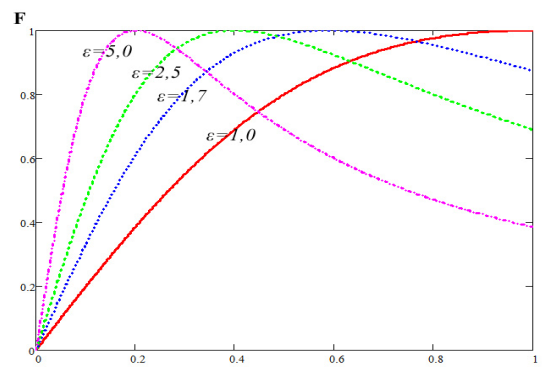
Główna reaktancja magnesująca:

$$X_\mu = \frac{4\mu_0 m_1 f_1 t_s (W_\phi K_0)^2}{\pi K \mu \delta_e P} \quad (12)$$

Oporność czynna części wtórnej:

$$R_2' = \frac{X_\mu}{\varepsilon_0} \quad (13)$$

gdzie ε_0 współczynnik, jakości konstrukcji Laithwaite'a, stanowiący jedno z ważniejszych kryteriów, które można wykorzystać przy ocenie konstrukcji LSTI. Współczynnik ten jest związany z właściwościami maszyny do przetwarzania energii z jednej formy na drugą.



Rys. 4. Współczynnik jakości ε

Na rys. 4 pokazano krzywe siły F w funkcji poślizgu s dla różnych wartości współczynnika ε_0 . Znając warunki pracy projektowanego silnika oraz w oparciu o powyższą charakterystykę (rys. 4) można w prosty sposób dokonać obliczeń parametrów X_μ i R_2' w oparciu o optymalną wartość współczynnika ε_0 .

W celu wyznaczenia reaktancji rozproszenia X_1 należy obliczyć współczynniki permeancji właściwej dla strumienia rozproszenia żłobkowego, wokół połączeń czołowych oraz rozproszenia różnicowego. Reaktancję wybieranej części wtórnej X_2' opisuje zależność:

$$X_2' = 24\mu_0 \omega_s \left(\pi d_{sr} \right) \frac{(\lambda_{p2} + \lambda_{d2}) (W_\phi K_0)}{N_p} \quad (14)$$

gdzie:

$d_{sr} = (d_1 + d_2)/2$ – średnia średnica warstwy części wtórnej

N_{p2} – ogólna liczba żłobków części wtórnej na długości aktywnej induktora L_i

λ_{p2} i λ_{d2} – współczynniki permeancji właściwej dla rozproszenia żłobkowego i różnicowego

4. Charakterystyki eksploatacyjne

Zadając rząd poślizgów w zakresie $0 \div 1$ obliczamy według schematu zastępczego (rys. 3) charakterystyki eksploatacyjne: prądu induktora I_1 oraz siły ciągu F .

Prąd fazy induktora:

$$I_1 = \frac{U_N}{\sqrt{R_{we}^2 + X_{we}^2}} \quad (15)$$

gdzie:

$$R_{we} = R_1 + \frac{s \cdot R_2' \cdot X_\mu^2}{R_2'^2 + s^2 X_\mu^2}$$

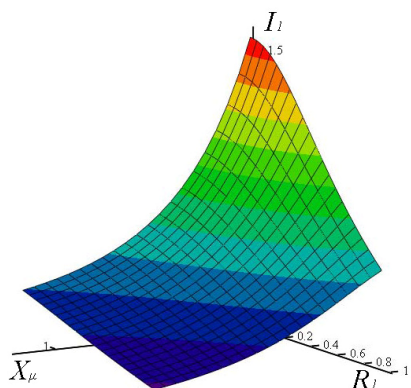
$$X_{we} = X_1 + \frac{R_2'^2 \cdot X_\mu^2}{R_2'^2 + s^2 X_\mu^2}$$

Należy zadbać, aby prąd I_1 nie przekroczył pewnej wartości, przy której uzwojenie osiąga graniczny dopuszczalny przyrost temperatury. Siła pociągowa może być obliczona według formuły:

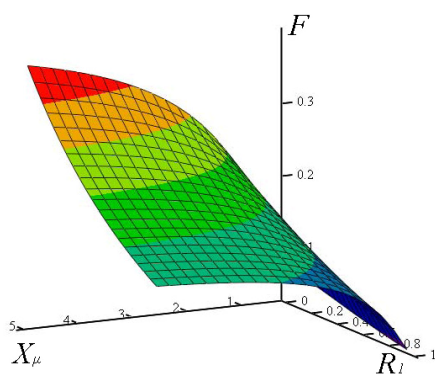
$$F = \frac{3I_2'^2 R_2'}{S \cdot 2\pi_1} = \frac{3I_2'^2 R_2' K_{os}}{S \cdot 2\pi_1 \left[\left(\frac{1}{s\varepsilon_0} \right)^2 + 1 \right]} \quad (16)$$

gdzie:

$\varepsilon_0 = X_m / R_2'$ – współczynnik jakości TSIL (G)



Rys.5. Zależność prądu fazy induktora od oporności uzwojenia fazowego i reaktancji magnesującej $I_1 = f(X_\mu, R_l)$.



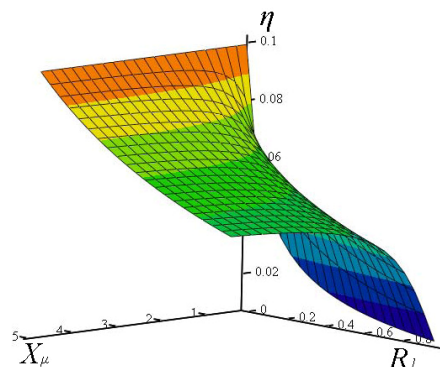
Rys. 6 Zależność siły ciągu LSTI od oporności uzwojenia fazowego i reaktancji magnesującej $F = f(X_\mu, R_l)$.

5. Wskaźniki energetyczne

Głównymi wskaźnikami energetycznymi maszyn prądu przemiennego są współczynnik mocy $\cos\varphi$ i sprawności η .

Sprawność, zgodnie z definicją, stanowi stosunek mocy użytecznej silnika do mocy pobranej z sieci. Dla ułatwienia obliczeń współczynników sprawności – η i mocy – $\cos\varphi$ można zaniedbać straty w magnetowodzie. Sprawność LSTI możemy wtedy obliczyć wg następującej formuły:

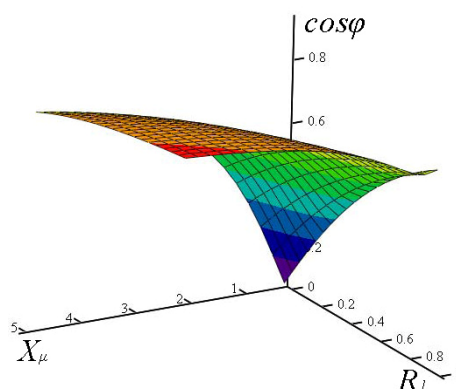
$$\eta = \frac{F 2f_1 (1-s)}{F 2f + 3R_1 I_1^2} \quad (17)$$



Rys.7. Zależność sprawności od oporności uzwojenia fazowego i reaktancji magnesującej $\eta = f(X_\mu, R_l)$.

Współczynnik mocy $\cos\varphi$, mówiący o wykorzystaniu dostarczonej do LSTI mocy w postaci mocy użytecznej, wyznacza się przy uproszczeniach analogicznych jak dla współczynnika sprawności i zapisuje w postaci:

$$\cos\varphi = \frac{F 2f + 3R_1 I_1^2}{3U_N I_1} \quad (18)$$



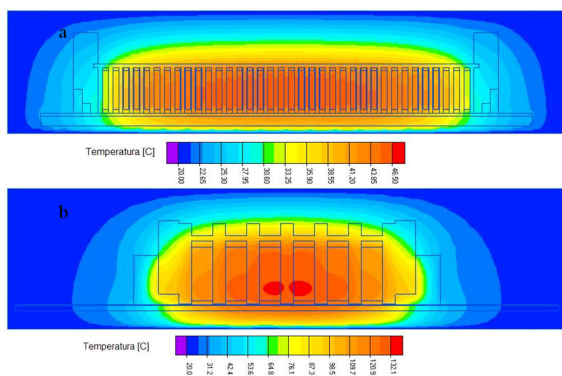
Rys.8. Zależność współczynnika mocy od oporności uzwojenia fazowego i reaktancji magnesującej $\cos\varphi = f(X_\mu, R_l)$.

W przypadku wymienionych wyżej wskaźników energetycznych ich wartości nie są zadawane na etapie projektowania. Jednak to one

pozwalają na określenie podstawowych kosztów eksploatacji maszyny.

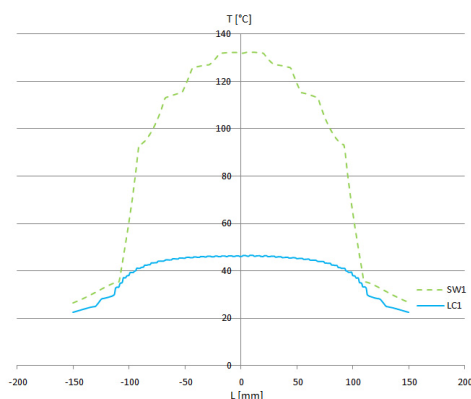
6. Analiza termiczna

LSTI wymagają szczególnego zwrócenia uwagi na zagadnienia termiczne ze względu na specyfikę konstrukcji [6], gdyż ciepło z induktora oddawane jest do otoczenia poprzez konwekcję i promieniowanie. Przy projektowaniu i eksploatacji LSTI zagadnieniom cieplnym nie zawsze poświęca się wystarczająco dużo uwagi.



Rys. 9. Obraz pól temperaturowych silników LSTI typu: a) LC1, b) TW1

Dzięki analizie termicznej można w większym stopniu sprawdzić wymogi stawiane przez normy oraz formowanie rozkładu pola temperatury w celu lepszego wykorzystania materiałów konstrukcyjnych i zwiększenia niezawodności maszyny. W ramach badań cieplnych, przeprowadzonych w środowisku Elcut, otrzymano: rozkład i gradient temperatury – rys. 9 i rys. 10.



Rys. 10. Rozkłady temperatur maksymalnych dla LSTI typu: LC1 i TW1

Analizując np. rozkład temperatury (rys. 9) 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 $r=57\text{mm}$ i LC1 – $r=29\text{mm}$ od środka silnika (Rys. 10).

7. Podsumowanie

Podsumowując można powiedzieć, że kryterium dobrej konstrukcji jest współczynnik ε_0 i mała doprowadzana energia na jednostkę siły ciągu na wyjściu. Innymi charakterystykami LSTI, które mogą być brane pod uwagę są siła ciągu i prąd rozruchowy, sprawność η i $\cos\varphi$. Odpowiedni dobór wymiarów konstrukcyjnych silnika ma znaczący wpływ na jego parametry. Należy zwrócić uwagę na to, aby współczynniki energetyczne nowo projektowanych maszyn były wyższe od dotychczas wytwarzanych.

8. Literatura

- [1] Gieras J.F.: Linear induction drives, Oxford Science Publications, Oxford, 1994
- [2] Nasar S.A., Boldea I., Linear motion electric machines, John Wiley & Sons Inc, 1976
- [3] Sokołowa E.M., Moszyński Y.A.: Cylindriczeskije liniejnyje asynchronnyje dwigateli, Izd. MEI, Moskwa 1998
- [4] Wiszniewski S., „Analiza wybranych charakterystyk liniowego silnika tubowego indukcyjnego”, Wiadomości Elektrotechniczne, 4/2010, s.40-44.
- [5] Dąbrowski M.: Projektowanie maszyn elektrycznych – prądu przemiennego, WNT, Warszawa, 1994
- [6] Bula K., Identyfikacja stałych parametrów termicznych w schemacie cieplnym silnika liniowego płaskiego, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Elektrotechnika z.18, Nr 146, 1996

Autor

Mgr inż. Sebastian Wiszniewski, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel. 091 449 46 59, e-mail: wisz@zut.edu.pl