

Wybrane charakterystyki silnika indukcyjnego liniowego

Streszczenie. Przedmiotem pracy jest silnik indukcyjny liniowy, jednostronny z litym uzwojeniem bieźnika. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń uzyskane na podstawie opracowanego w przestrzeni 2D, parametrycznego modelu polowego tej maszyny. Zastosowanie wymuszenia harmonicznego w modelu polowym umożliwia obliczenie m.in. prądów wirowych płynących w uzwojeniu bieźnika oraz sił elektromagnetycznych powstających w silniku.

Abstract. In this paper was presented result of 2d field modeling. One-side linear induction motor with secondary solid windings was modeling. As the result of FEM modeling is selected characteristics of linear induction motor, (**Selected characteristics of linear induction motor**).

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny liniowy jednostronny, modelowanie polowe, metoda elementów skończonych.

Keywords: one-side linear induction motor, field modeling, finite element method.

Wstęp

Stosowane w przemyśle urządzenia wymagają najczęściej napędu realizowanego za pomocą silników obrotowych. Czasem pojawia się konieczność realizacji napędu liniowego. W większości przypadków możliwe jest zastosowanie silnika obrotowego i przekładni przekształcających ruch obrotowy na liniowy (np.: ślimakowej i/lub śrubowej). Istnieją jednak układy napędowe, w których takie zestawienie jest np. bardziej zawodne od bezpośredniego napędu silnikiem liniowym. Silniki linowe znajdują zastosowanie, jako elementy wykonawcze o ruchu liniowym w liniach produkcyjnych (np. w postaci niezawodnych siłowników o dużym przyspieszeniu) oraz jako napędy liniowe o specyficznych wymaganiach.

Brak jest obecnie dopracowanych metod projektowania silników indukcyjnych liniowych [1, 2, 3, 4]. W niniejszym artykule przedstawiony został fragment obliczeń dotyczących projektowania i modelowania silników liniowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych [5].

Cel i opis metody

Celem prezentowanych badań było wyznaczenie wymiarów geometrycznych konstrukcji silnika zapewniającej uzyskanie maksymalnej siły. Wymiary geometryczne zostały ograniczone objętością przeznaczoną na poszczególne części silnika (bieźnik i wzbudnik), wymaganą – ze względów mechanicznych – wielkością szczeliny powietrznej i stratami cieplnymi generowanymi w silniku. Przyjęto wartość strat oddawanych z powierzchni bocznej i dolnej jarzma wzbudnika na 2 W/cm^2 . Jest to wielkość dwukrotnie większa, niż ilość strat oddawanych przez boczną powierzchnię walcową stojana w klasycznych cylindrycznych silnikach indukcyjnych. W rzeczywistym silniku oddawanie ciepła będzie następowało z każdej powierzchni silnika.

Poszukiwania najlepszego kształtu silnika zostały wykonane w oparciu o metodę Gaussa-Seidela. Metoda ta polega na iteracyjnym poszukiwaniu minimum funkcji za pomocą przeszukiwania jednej współrzędnej w jednym kroku. Metoda jest mało efektywna, gdy poziomice funkcji układają się w kształt długich wąskich dolin. Wymagane jest wtedy poruszanie się z małym krokiem, co zwiększa ilość iteracji.

Planowane było przeprowadzenie analizy wpływu:

- szerokości żłobka/zęba wzbudnika (przy stałej podziałce żłobkowej i przy stałych stratach w uzwojeniu wzbudnika),
- wysokości zęba/jarzma wzbudnika (przy stałych stratach w uzwojeniu wzbudnika i stałej wysokości wzbudnika),
- wysokości ferromagnetyka/przewodnika bieźnika (przy stałej wysokości bieźnika), na średnią wartość siły ciągu w zakresie od $s=1$ (rozruch) do $s=0,3$ (praca z prędkością znamionową).

Wszystkie analizy przeprowadzono dwukrotnie: dla założenia, że w ferromagnetyku bieźnika nie indukują się prądy wirowe (rdzeń bieźnika jest blachowany) oraz dla założenia, że w ferromagnetyku bieźnika indukują się prądy wirowe (rdzeń bieźnika jest lity).

Model

Model polowy silnika indukcyjnego liniowego opracowano za pomocą profesjonalnego oprogramowania polowego Opera 2D [6]. Model umożliwia parametryczne zadawanie geometrii silnika oraz definiowanie serii obliczeń, w której zmieniane są wartości wybranego parametry modelu.

Przy budowie modelu przyjęto następujące założenia upraszczające:

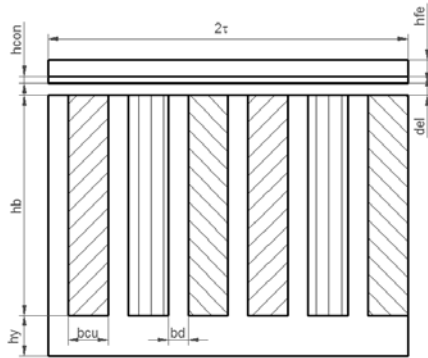
- Pominięto zjawiska brzegowe tzn. efekty związane z połączeniami czołowymi uzwojeń. Pozwoliło to na zastąpienie pola trójwymiarowego polem płasko-równoległym, opisanym w przekroju poprzecznym maszyny;
- Pominięto zjawiska krańcowe tzn. efekty związane ze wzbudzaniem pola na jednym krańcu i jego zanikiem na drugim. Pozwala to na ograniczenie modelu do jednej pary biegunów z uwzględnieniem właściwych warunków brzegowych;
- Jako wymuszenie w modelu zadawane są gęstości prądów w obszarach przekrojów poszczególnych uzwojeń wzbudnika;
- Przyjęto że uzwojenie wzbudnika ma jeden żłobek na biegun i fazę ($q=1$).

Uwzględniając powyższe założenia zamodelowano zjawiska polowe we fragmencie przekroju poprzecznego silnika o długości dwóch podziałek biegunowych. Takie podejście umożliwiło znaczne skrócenie czasu obliczeń [7]. Na rysunku 1 przedstawiono modelowany fragment przekroju poprzecznego silnika i pokazano zbiór wymiarów geometrycznych, które jednoznacznie określają jego konstrukcję. Modelowany fragment przekroju silnika składa się z przekrojów: żłobkowanego wzbudnika (w dolnej części rysunku), szczeliny powietrznej i dwuwarstwowego bieźnika (w górnej części rysunku);

Poniżej zamieszczono opis przedstawionych wymiarów (rys. 1) oraz ich liczbowe wartości bazowe:

- h_y – grubość jarzma (10mm),
- h_b – wysokość zęba wzbudnika, równa głębokości żłobka wzbudnika (55mm),
- bd – szerokość zęba wzbudnika (5mm),
- b_{cu} – szerokość żłobka wzbudnika (10mm),
- del – grubość szczeliny powietrznej (3mm),
- h_{con} – grubość warstwy przewodnika – lite uzwojenie bieźni (2,5mm),

- h_{fe} – grubość warstwy ferromagnetyka bieźnika (5mm),
- 2τ – dwie podziałki biegunowe modelowanego silnika. Ponadto do zbioru parametrów modelu należą:
- l_{Fe} – grubość pakietu blach silnika (65mm),
- Q_s – liczba żłobków silnika (24),
- p – liczba par biegunów ($Q_s/6$),
- τ_Q – podziałka żłobkowa ($b_d + b_{cu}$),
- m – liczba pasm fazowych (3),
- τ_p – podziałka biegunowa ($m \cdot \tau_Q$),
- l – długość wzbudnika modelowanego silnika (315mm),
- P – moc cieplna oddawana z powierzchni bocznej i dolnej jarzma wzbudnika silnika ($2W/cm^2$).



Rys. 1. Model polowy wraz z nazwaniem wymiarów geometrycznych

Na rysunku 1, za pomocą odpowiedniego kreskowania, zaznaczono pary boków zezwojów należących do poszczególnych pasm uzwojenia wzbudnika.

Na krawędziach pionowych (skrajnej lewej i prawej) modelu, zostały zadane warunki brzegowe symetryczne (prawa krawędź „styka się” z lewą). Na krawędziach poziomych (skrajnej górnej i dolnej) modelu zostały zadane warunki zerowej wartości z-towej składowej wektorowego potencjału magnetycznego. Oznacza to, że całe pole magnetyczne zamyka się w modelowanym przekroju.

Tak zdefiniowany model umożliwia łatwą zmianę geometrii silnika i seryjne obliczenia, przy zadaniu wielu wartości (w postaci wektora) dla wybranego parametru.

Zastosowane oprogramowanie polowe umożliwia obliczanie następujących parametrów całkowitych:

- siły ciągu czyli składowej x-owej siły elektromagnetycznej działającej pomiędzy wzbudnikiem i biegnikiem na jednostkę długości. Siła ta jest obliczana w wyniku całkowania naprężeń Maxwella wzdłuż prostej leżącej w szczelinie powietrznej,
- straty Joule’a na prądy wirowe w litym przewodniku bieźnika na jednostkę długości z zależności

$$\Delta P_w = \iint_s \frac{j^2}{\gamma} ds, \text{ gdzie } s - \text{przekrój poprzeczny regionu}$$

z prądem, j – gęstość prądu w regionie – wyliczana przez program, γ – przewodność obszaru z prądem,

- średnia wartość kwadratu modułu indukcji na powierzchni przekroju rdzenia na jednostkę długości, z której są wyliczane straty na przemagnesowywanie rdzenia wzbudnika.

Wartości parametrów całkowitych odnoszą się do modelu o długości rdzenia (w głąb rysunku 1) równej przyjętej jednostce długości, czyli 1mm. Aby obliczyć wartości poszczególnych parametrów dla całego silnika, to wartości obliczone z modelu należy pomnożyć przez długość rdzenia maszyny w milimetrach i liczbę par biegunów modelowanego silnika.

Zatem całkowita wartość siły ciągu:

$$(1) \quad F_{Tx} = F_x \cdot l_{Fe} \cdot p$$

gdzie: F_{Tx} – siła ciągu dla całego silnika, F_x – siła ciągu dla modelu polowego, l_{Fe} – grubość pakietu blach silnika, p – liczba par biegunów silnika,

- straty na nagrzewanie litego uzwojenia bieźnika:

$$(2) \quad \Delta P_{Tw} = \Delta P_w \cdot l_{Fe} \cdot p$$

gdzie: ΔP_{Tw} – straty Joule’a w litym przewodniku bieźnika dla całego silnika, ΔP_w – straty Joule’a w litym przewodniku bieźnika dla modelu polowego,

- aby zachować stałość mocy strat w modelu, przyjęto że ilość strat mocy elektrycznej oddawanej przez powierzchnię boczną i dolną jarzma wynosi $2W/cm^2$ (założenie: pozostałe powierzchnie nie oddają mocy ciepłej do otoczenia). Dla takiego założenia gęstość prądu w przewodniku określona jest wzorem:

$$(3) \quad j = \sqrt{\frac{P_{oto} \cdot s_y \cdot \gamma_{Cu}}{l_{Fe} \cdot b_{Cu} \cdot h_b \cdot k_{Cu}}}$$

gdzie: j – gęstość prądu uzwojenia wzbudnika, b_{Cu} – szerokość żłobka wzbudnika, h_b – wysokość zęba/żłobka wzbudnika, γ_{Cu} – przewodność miedzi, k_{Cu} – współczynnik określający wypełnienie żłobka miedzią, s_y – powierzchnia boczna i dolna jarzma,

- ze względu na stałość oddawanej mocy (wzór 3) straty mocy wywołane prądem płynącym w uzwojeniu wzbudnika są określone wzorem:

$$(3a) \quad \Delta P_{Cu} = P_{oto} \cdot s_y$$

gdzie: ΔP_{Cu} – straty Joule’a wywołane prądem płynącym w uzwojeniu wzbudnika, P_{oto} – straty na powierzchni bocznej i dolnej jarzma,

- straty mocy w blachach wzbudnika:

$$(4) \quad \Delta P_{wz} = (b_d \cdot h_b + \tau_Q \cdot h_y) \cdot l_{Fe} \cdot Q_s \cdot \rho_{Fe} \cdot f(B) \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2$$

gdzie: ΔP_{wz} – straty na przemagnesowywanie rdzenia wzbudnika, b_d – szerokość zęba, h_y – wysokość jarzma, ρ_{Fe} – gęstość żelaza, $f(B)$ – wielomian obliczający straty na przemagnesowywanie blach rdzenia przy znanej średniej indukcji, f – częstotliwość napięcia zasilania,

- straty mocy w blachach bieźnika:

$$(5) \quad \Delta P_{bi} = h_{Fe} \cdot \tau_Q \cdot l_{Fe} \cdot p \cdot \rho_{Fe} \cdot f(B) \cdot \left(\frac{f \cdot s}{50}\right)^2$$

gdzie: ΔP_{bi} – straty na przemagnesowywanie rdzenia bieźnika, h_{Fe} – wysokość rdzenia bieźnika, s – poślizg bieźnika silnika indukcyjnego,

- suma strat w silniku:

$$(6) \quad \sum P = \Delta P_{Tw} + \Delta P_{Cu} + \Delta P_{wz} + \Delta P_{bi}$$

gdzie: $\sum P$ – suma strat w uzwojeniu i w rdzeniu wzbudnika oraz bieźnika,

- moc mechaniczna (wyjściowa) generowana przez silnik:

$$(7) \quad P_{out} = F_{Tx} \cdot \tau_p \cdot 2 \cdot f \cdot (1-s)$$

gdzie: P_{out} – moc wyjściowa generowana przez silnik, ,

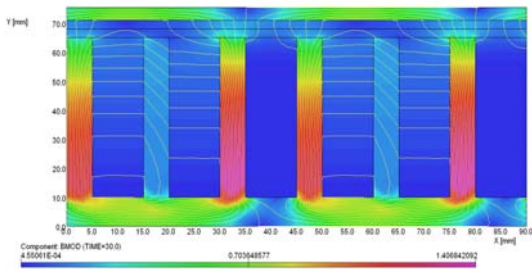
- sprawność silnika:

$$(8) \quad \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P}$$

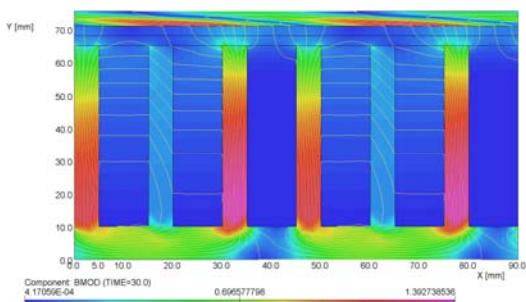
gdzie: η – sprawność silnika.

Realizacja badań

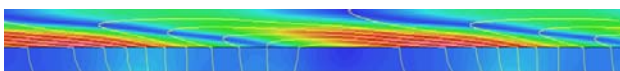
Poniżej przedstawione zostały wyniki obliczeń modelu połowego jednostronnego liniowego silnika indukcyjnego. Model został podzielony na około 20 tysięcy elementów. Na rysunkach 2 i 3 zostały przedstawione rozkłady linii sił pola wraz z modułem indukcji magnetycznej w modelach z blachowanym i litym rdzeniem bieźnika, dla poślizgu: $s=0,3$ – co odpowiada prędkości znamionowej i kąta fazowego napięcia zasilania równego 30 stopni. Można zaobserwować różnice w rozkładzie modułu indukcji magnetycznej (linii sił pola). W blachowanym rdzeniu bieźnika nie indukują się prądy wirowe (rys. 2 i 4). W litym rdzeniu bieźnika indukują się prądy wirowe co skutkuje pojawieniem się gęstości prądu na rysunku 5 i 5a w bieźniku i zniekształconym rozkładem modułu indukcji (rysunek 3 i 3a) w stosunku do rysunku 2.



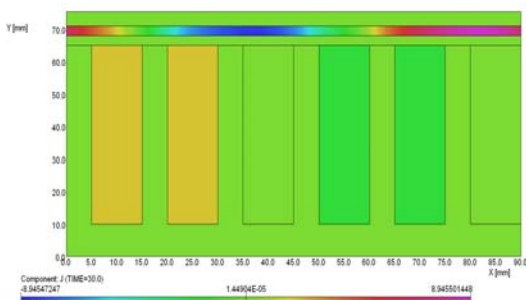
Rys. 2. Mapa modułu indukcji i rozkład linii sił pola dla silnika o danych wejściowych i poślizgu $s=0,3$ dla modelu z blachowanym rdzeniem bieźnika i kąta fazowego napięcia zasilania równego 60 stopni



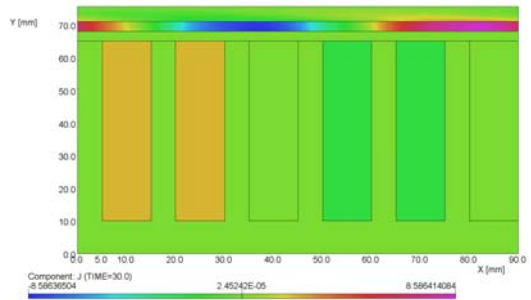
Rys. 3. Mapa modułu indukcji i rozkład linii sił pola dla silnika o danych wejściowych i poślizgu $s=0,3$ dla modelu z litym rdzeniem bieźnika i kąta fazowego napięcia zasilania równego 60 stopni



Rys. 3a. Powiększony fragment mapy modułu indukcji i rozkład linii sił pola bieźnika dla 5/3 podziałki żłobkowej wzбудnika z rysunku 3.



Rys. 4. Mapa rozkładu gęstości prądu dla silnika o danych wejściowych i poślizgu $s=0,3$ dla modelu z blachowanym rdzeniem bieźnika i kąta fazowego napięcia zasilania równego 60 stopni

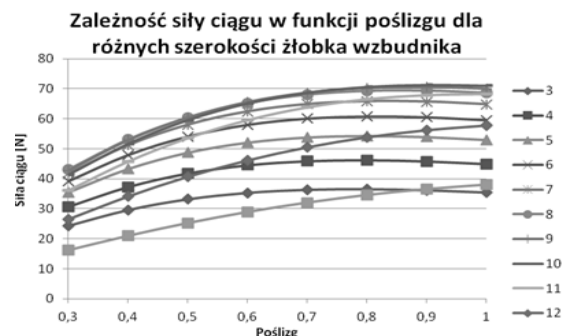


Rys. 5. Mapa rozkładu gęstości prądu dla silnika o danych wejściowych i poślizgu $s=0,3$ dla modelu z litym rdzeniem bieźnika i kąta fazowego napięcia zasilania równego 60 stopni



Rys. 5a. Powiększona mapa rozkładu gęstości prądu w bieźniku dla 5/3 podziałki żłobkowej wzбудnika z rysunku 5

Na rysunkach 6 - 9 przedstawione są wyniki obliczeń siły ciągu w funkcji poślizgu dla silnika z blachowanym (rys. 6 i 7) i litym (rys. 8 i 9) bieźnikiem dla różnych szerokości żłobka wzбудnika. Zmieniana była również szerokość zęba wzбудnika w taki sposób by zachować stałą wielkość podziałki żłobkowej. Ponieważ z rysunków 6 i 8 trudno jest wybrać najwyższą położoną krzywą zastosowano kryterium maksymalnej siły średniej w całym zakresie użytecznych poślizgów, co zostało przedstawione na rysunkach 7 i 9. Z rysunku 7 możemy odczytać, że maksymalna średnia siła ciągu osiąga maksimum dla szerokości żłobka wzбудnika równego 9 mm. Podobnie jest na rysunku 9. Wyniki obliczeń dla maksymalizacji pola powierzchni pod charakterystyką mechaniczną silnika.

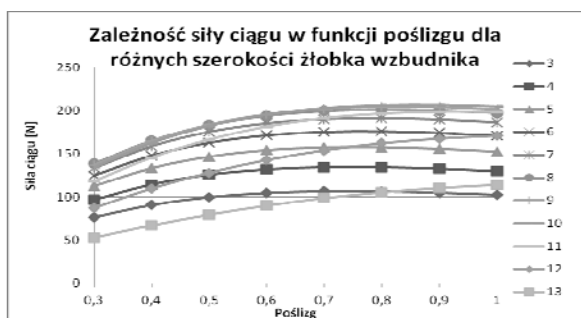


Rys. 6. Zależność siły ciągu w funkcji poślizgu dla różnych szerokości żłobka wzбудnika dla blachowanego rdzenia bieźnika



Rys. 7. Średnia wartość siły ciągu dla różnych szerokości żłobka wzбудnika dla blachowanego rdzenia bieźnika

W tabeli 1 został przedstawiony jest proces poszukiwań wymiarów konstrukcji zapewniającej maksymalną wartość siły ciągu dla zadanej objętości silnika. Jest to przedstawione zarówno dla silnika z blachownym jak i litym rdzeniem bieźnika.



Rys. 8. Zależność siły ciągu w funkcji poślizgu dla różnych szerokości żłobka wzbudnika dla litego rdzenia bieźnika

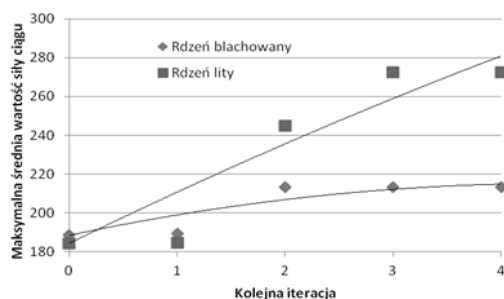


Rys. 9. Średnia wartość siły ciągu dla różnych szerokości żłobka wzbudnika dla litego rdzenia bieźnika

Tabela 1. proces poszukiwań wymiarów konstrukcji zapewniającej maksymalną wartość siły ciągu dla zadanej objętości silnika

Krok	Zmienna	Blachowany rdzeń bieźnika		Lity rdzeń bieźnika	
		Wartość	Siła	Wartość	Siła
0	-	-	188,4	-	184,3
1	b_{cu}/b_d	9/6	189,3	9/6	184,7
2	h_v/h_p	7/58	208,5	18/47	226,4
3	h_{con}/h_{fe}	2/5,5	212,2	2/5,5	226,4
4	b_{cu}/b_d	8/7	213,2	10/5	244,9
5	h_v/h_p	7/58	213,2	8/57	256,4
6	h_{con}/h_{fe}	2/5,5	213,2	2/5,5	256,1
7	b_{cu}/b_d	8/7	213,2	9/6	272,5
8	h_v/h_p	-	-	8/57	256,4
9	h_{con}/h_{fe}	-	-	2/5,5	256,1
10	b_{cu}/b_d	-	-	9/6	272,5

Na rysunku 10 zostały przedstawione kolejne kroki obliczeń i wartości maksymalnej siły średniej dla danej zmienności parametrów konstrukcyjnych. Jak możemy zaobserwować na ww. rysunku mniejszy rozrzut wyników uzyskujemy dla rdzenia blachowanego – rdzeń lity wprowadza większe błędy obliczeniowe w programie.



Rys. 10. Maksymalna średnia wartość siły ciągu dla kolejnego kroku obliczeń

W tabeli 2 zostały zamieszczone wymiary geometryczne konstrukcji początkowej silników i konstrukcji finalnej dla dwóch różnych konstrukcji bieźnika.

Tabela 2. wymiary geometryczne konstrukcji początkowej silników i konstrukcji finalnej dla dwóch różnych konstrukcji bieźnika

Symbol	Konstrukcja początkowa	Konstrukcja finalna	
		Blachowany rdzeń	Lity rdzeń
hy	10	7	8
hb	55	58	57
bd	5	7	6
bcu	10	8	9
del	3	3	3
hcon	2,5	2	2
hfe	5	5,5	5,5

Podsumowanie

Przeprowadzone badania modelu polowego pozwoliły na znalezienie takiego kształtu obwodu magnetycznego silnika w zadanej objętości, który generuje największą siłę ciągu. Dla obu konstrukcji szerokość żłobka wzbudnika uległa zwężeniu o 2mm względem wartości początkowej dla silnika z blachowanym rdzeniem bieźnika i o 1mm dla silnika z litym rdzeniem bieźnika, wysokość żłobka/zęba wzbudnika wzrosła o odpowiednio 3 i 2mm. Wysokość ferromagnetyka bieźnika wzrosła o 0,5mm, zaś wysokość jarzma uległa zmniejszeniu o odpowiednio 3 i 2mm. Zabiegi te pozwoliły na uzyskanie dla silnika:

- z blachowanym bieźnikiem: zwiększenie siły ciągu dla poślizgu $s=0,3$ (z 127N do 130N), przy zwiększeniu średniej wartości siły ze 188,4N do 213,2N przy jednoczesnym spadku sprawności o 1% wartości wejściowej (z 31,6% do 30,7%) dla poślizgu 0,3,
 - z litym bieźnikiem: zwiększenie siły ciągu dla poślizgu $s=0,3$ (z 134,3N do 184,6N), przy zwiększeniu średniej wartości siły ze 184,3N do 272,5N przy jednoczesnym wzroście sprawności o 0,2% wartości wejściowej (z 31,9% do 32,1%) dla poślizgu 0,3.
- Obliczenia przeprowadzane dla silnika z litym rdzeniem bieźnika trwały ponad trzy razy dłużej niż dla silnika z rdzeniem blachowanym.

Artykuł współfinansowany z pracy ECO-Mobilność WND-POIG.01.03.01-14-154/09



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Autor: mgr inż. Adam Rogalski, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Maszyn Elektrycznych, Pl. Politechniki 1, 00-660 Warszawa, E-mail: adam.rogalski@ee.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Boldea I., Nasar Syed A. Linear Electric Actuators and Generators, Cambridge University Press 2005
- [2] Boldea I., Nasar Syed A. The Induction Machine Handbook, CRC Press, 2010
- [3] Toliyat H.A., Kliman G.B., Handbook Of Electric Motors, CRC Press, 2004
- [4] Gieras J. F., Silniki indukcyjne liniowe, WNT, 1990
- [5] Herbst A., Kamiński G., Porównanie wyników elektromagnetycznych obliczeń polowych 2d i 3d dla jednostronnego indukcyjnego silnika liniowego, Zeszyty Problemowe BOBRME Komel – Maszyny Elektryczne Nr 5/2011 (93)
- [6] PC-Opera Reference Manual VF Ltd, 24 Bankside Kidlington Oxford OX5 1JE England
- [7] Kamiński G., Przyborowski W., Uzwojenia i parametry maszyn elektrycznych, OWPW, 1998