

Bronisław TOMCZUK  
Andrzej WAINDOK

# WPŁYW WYMIARÓW UZWOJENIA STOJANA NA SIŁĘ CIĄGU SILNIKA TUBOWEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

**STRESZCZENIE** *W pracy zbadano wpływ szerokości i wysokości przekroju cewek stojana na siłę zaczepową i znamionową silnika liniowego tubowego z magnesami trwałymi. Badany silnik jest prototypową konstrukcją, w której uzwojenie stojana podzielono na 5 cewek tworzących fazy. Wraz ze zmianą wymiarów cewek zmianie ulegały także wymiary segmentów stojana. W obliczeniach wariantowych zachowano stałą gęstość prądu wzbudzenia w cewkach stojana.*

**Słowa kluczowe:** *silnik liniowy tubowy, obliczenia polowe, siła zaczepowa i ciągu*

## 1. WSTĘP

---

Istnieją wiele typów silników liniowych [2], [4], [5]. Spośród nich coraz większą popularność zyskują silniki tubowe [1], [3], [6]. Ich główną zaletą jest korzystny stosunek siły ciągu do masy oraz niewielkie pole rozproszenia, co znajduje swoje odzwierciedlenie w sprawności. W wielu zastosowaniach mogą one w przyszłości zastąpić napędy liniowe hydrauliczne i pneumatyczne.

---

**prof. dr hab. Bronisław TOMCZUK**  
b.tomczuk@po.opole.pl

**mgr inż. Andrzej WAINDOK**  
a.waindok@po.opole.pl

Katedra Elektroniki Przemysłowej  
Politechnika Opolska

Nieliczne wady tych silników wiążą się z nieco wyższymi kosztami ich wytworzenia.

W związku ze wzrostem znaczenia silników liniowych w automatyzacji, celowe wydaje się przebadanie wpływu zmian w konstrukcji tych silników na ich parametry. Jednym z najważniejszych parametrów jest siła ciągu, od której zależą takie parametry jak prędkość i przyspieszenie. Dlatego też, w niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące wpływu podstawowych wymiarów uzwojeń na wartość siły magnetycznej w prototypowym silniku liniowym tubowym z magnesami trwałymi. Silnik ten został zaprojektowany i wykonany w Katedrze Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Opolskiej.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY

Uwzględniając symetrię osiową silnika, zagadnienie brzegowe rozwiązano w układzie 2-wymiarowym z wykorzystaniem potencjału wektorowego  $\vec{A}$ . Równanie opisujące rozkład pola magnetycznego ma postać:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(\vec{B})} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (1)$$

Przy założeniu symetrii osiowej, równanie (1) przyjmuje następującą postać:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{\mu(\vec{B})} \left( \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} + \frac{A_\varphi}{r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu(\vec{B})} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) = -J_\varphi \quad (2)$$

Rozwiązanie powyższego równania pozwala na wyznaczenie nie tylko rozkładu pola, lecz także jego parametrów całkowitych, ważnych z punktu widzenia analizy pracy urządzenia. W przypadku analizowanego silnika do parametrów tych należy indukcyjność uzwojeń oraz siła działająca na biegnik. Indukcyjność tę można obliczyć ze znanego wzoru definicyjnego

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N \cdot \Phi}{I} = \frac{N \cdot \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{s}}{I} \quad (3)$$

gdzie  $N$  jest liczbą zwojów uzwojenia, a  $\Phi$  strumieniem przenikającym jeden zwój.

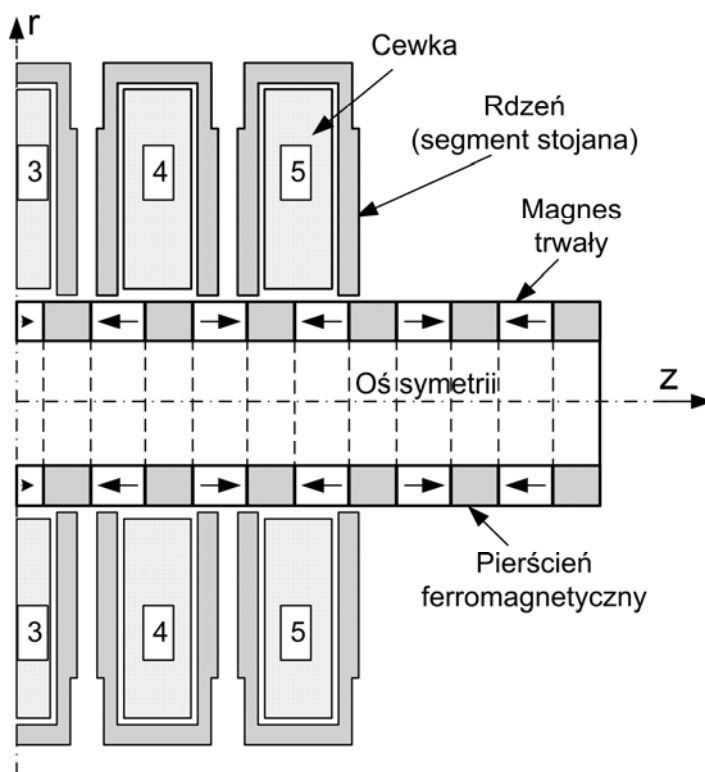
Siłę magnetyczną, działającą na biegnik, można obliczyć wykorzystując tensor naprężeń Maxwella  $\vec{T}$  [7], z zależności:

$$\vec{F} = \oint_S \vec{T} \cdot d\vec{s} \quad (4)$$

Wartości siły magnetycznej obliczono dla różnych położań biegnika. Tak więc, wyznaczono siłę maksymalną  $F_{MAX}$ , występującą w pewnym położeniu biegnika. Podano też średnią wartość siły  $F_{AV}$  w całym zakresie ruchu biegnika.

### 3. ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ

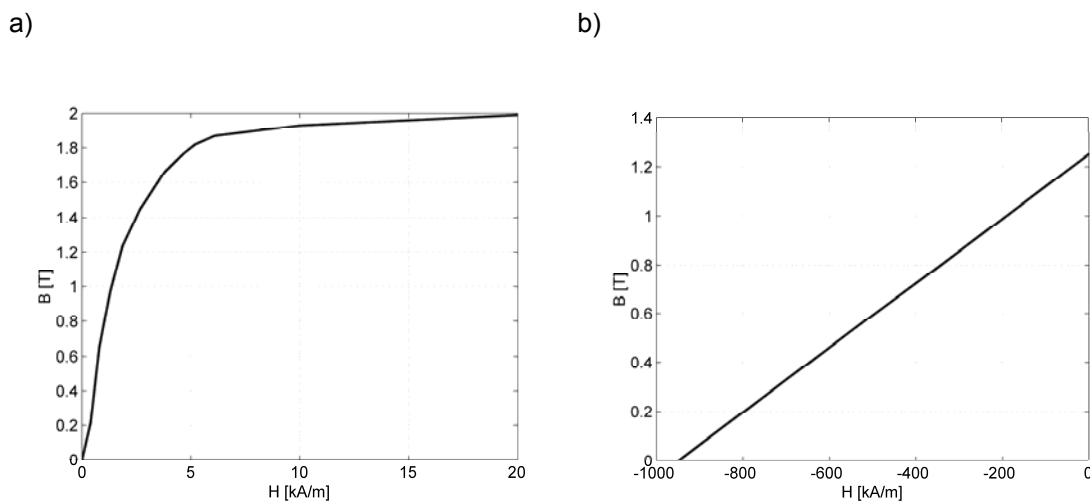
Badany silnik ma konstrukcję pięciofazową. Stojan składa się z pięciu segmentów wewnątrz których znajdują się cewki (rys. 1). Biegnik składa się z na przemian ułożonych pierścieni ferromagnetycznych i magnesów trwałych.



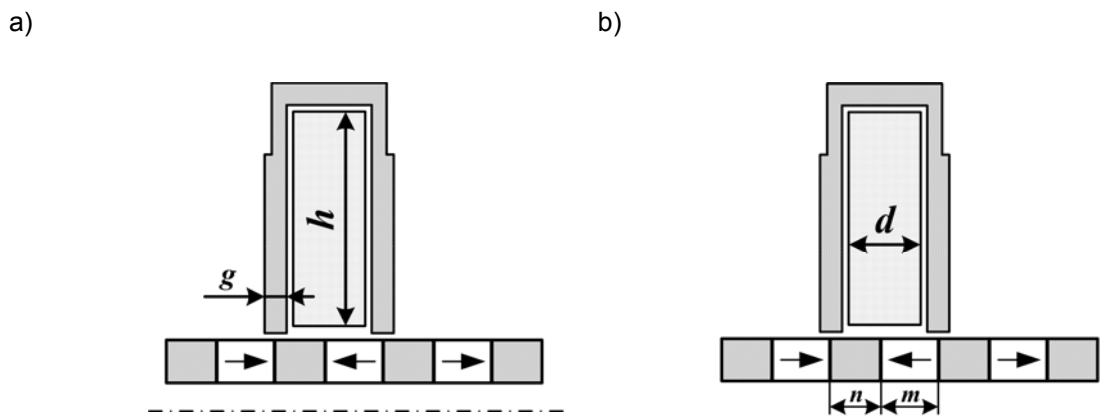
Rys. 1. Połowa przekroju silnika

Obliczenia wykonano z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Dla materiału ferromagnetycznego stojana przyjęto nieliniową charakterystykę magnesowania przedstawioną na rys. 2a. Magnesy trwałe NdFeB opisano za pomocą liniowej charakterystyki odmagnezowania (rys. 2b).

W pracy zbadano wpływ wysokości  $h$  oraz szerokości  $d$  przekroju cewek uzwojenia stojana (rys 3) na wartość maksymalną oraz średnią siły zaczepowej i znamionowej. Grubości segmentów stojana  $g = 3$  mm nie zmieniano. Do obliczeń założono pracę krokową silnika, w której w każdej chwili jest zasilana tylko jedna cewka z prądem o wartości znamionowej  $I_N = 8$  A. Przedstawione tutaj wyniki obliczeń dotyczą zasilania cewki środkowej (nr 3, rys. 1).



Rys. 2. Charakterystyka magnesowania rdzenia (a) oraz odmagnezowania magnesów trwałych (b)



Rys. 3. Wymiary geometryczne podlegające zmianom:  
a) wysokość cewki, b) szerokość cewki

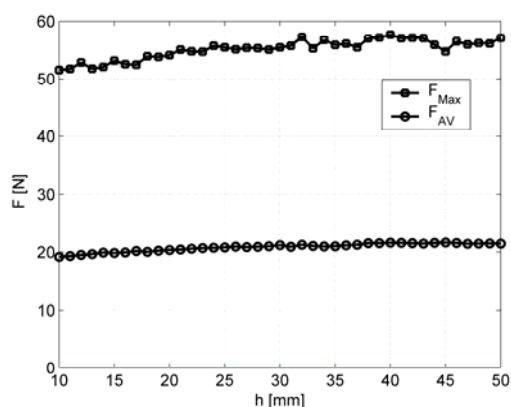
## 4. WYNIKI OBLICZEŃ

Wyznaczono stosunek wartości średniej siły ciągu do maksymalnej. Wartości tego stosunku podano w odniesieniu do siły magnetycznej pochodzącej od magnesów trwałych (zaczeprawej) oraz siły podczas wzbudzenia silnika.

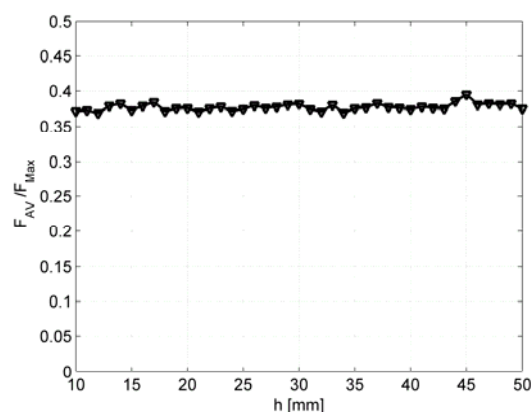
Wartość maksymalna siły to największa ze wszystkich wartości otrzymanych dla różnych położeń biegnika. Wartość średnia siły jest określana jako średnia arytmetyczna wartości otrzymanych dla wszystkich analizowanych położeń biegnika.

### 4.1. Wpływ wysokości cewek uzwojenia na siłę działającą na biegnik

Wysokość cewek stojana zmieniano w zakresie od 10 mm do 50 mm, co 1 mm. Wraz ze zmianą wymiarów cewek zmieniały się oczywiście wymiary ferromagnetycznych segmentów stojana. Wyniki obliczeń przedstawiono w formie wykresów i rozkładów linii sił pola magnetycznego, dla założonej stałej gęstości prądu w uzwojeniu stojana.



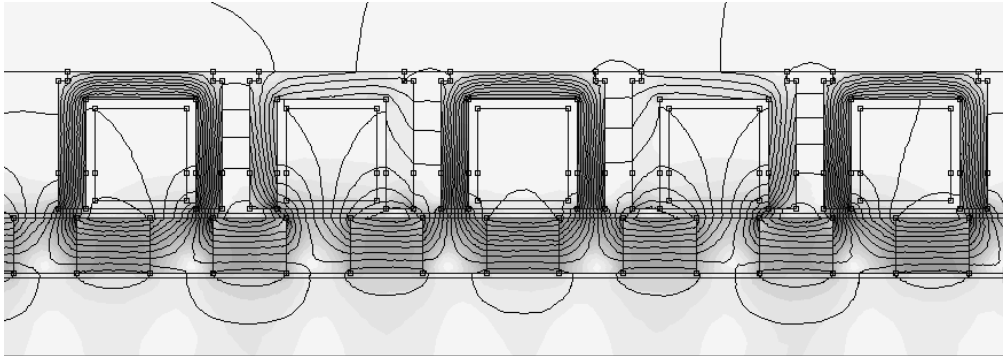
Rys. 4a. Maksymalna i średnia wartość siły zaczepowej



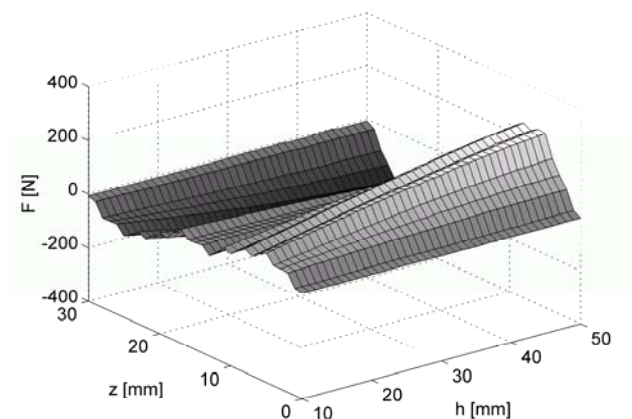
Rys. 4b. Stosunek średniej siły zaczepowej do wartości maksymalnej

Siła zaczepowa, występująca przy braku wzbudzenia uzwojeń, może się zmienić jedynie na skutek zmian wymiarów magnesów, lub elementów ferromagnetycznych. Jak można było oczekiwać, obliczenia wykazały, że zmiana wy-

sokości cewek nie wpływa praktycznie na wartość siły zaczepowej. Zarówno wartość średnia, jak i maksymalna tej siły zmienia się zaledwie o kilka procent przy 5-krotnej zmianie wysokości cewek (rys. 4a). Stosunek wartości średniej do maksymalnej siły zaczepowej również jest niezależny od wysokości cewek (rys. 4b).



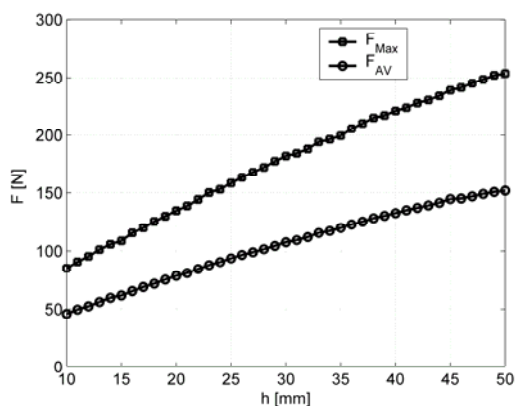
Rys. 5. Rozkład pola magnesów trwałych w cewkach o małej wysokości ( $h = 10$  mm)



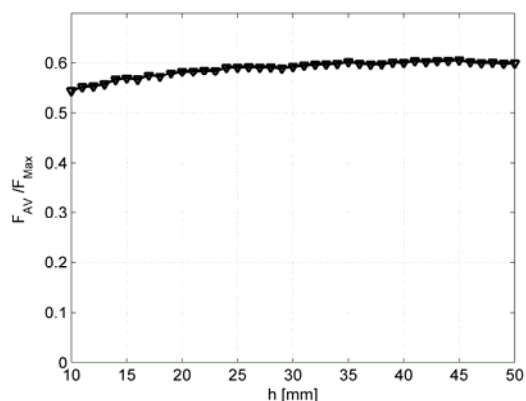
Rys. 6. Zależność siły ciągu od położenia biegnika wzdłuż osi  $z$  dla różnych wartości  $h$ , ( $I = 8$  A)

wysokości cewek wiąże się to ze wzrostem przepływu. Stosunek obu sił nieznacznie zależy od wysokości cewek (rys. 7b).

Na rysunku 6 przedstawiono wartości siły ciągu dla różnych wysokości  $h$  cewek stojana, w funkcji położenia biegnika. Zarówno wartość średnia, jak i maksymalna tej siły obliczone w całym zakresie ruchu biegnika zależą w znacznym stopniu od wysokości cewek (rys. 7a). Przy 5-krotnym wzroście  $h$ , siła maksymalna wzrasta 2,5-krotnie, natomiast siła średnia 3-krotnie. Ponieważ celowe jest utrzymanie stałej gęstości prądu, to wzrost wy-

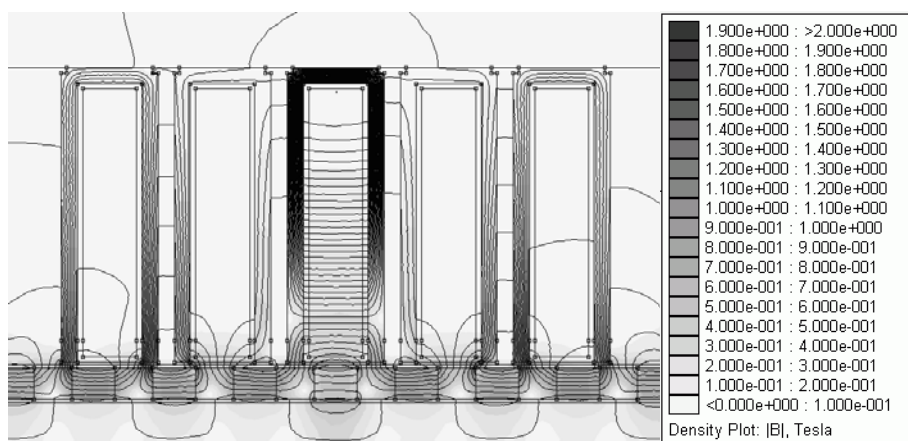


Rys. 7a. Maksymalna i średnia wartość siły przy wymuszeniu znamionowym



Rys. 7b. Stosunek wartości siły średniej do maksymalnej przy wymuszeniu znamionowym.

Wzbudzenie cewki stojana oczywiście wpływa na rozkład pola w segmencie stojana (rys. 8, por. z rys. 5). W przedstawionym przypadku, pole od prądu płynącego w cewce i pole pochodzące od magnesów trwałych są przeciwnie skierowane. W wewnętrznej części cewki następuje „wygaszenie” obu pól (rys. 8).



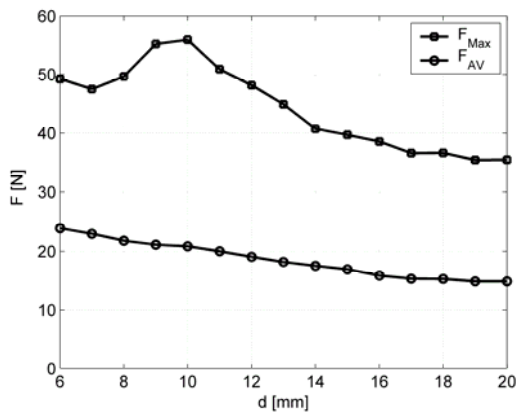
Rys.8. Rozkład pola przy zasilaniu cewki środkowej prądem  $I = 8$  A

## 4.2. Zmiana szerokości uzwojenia

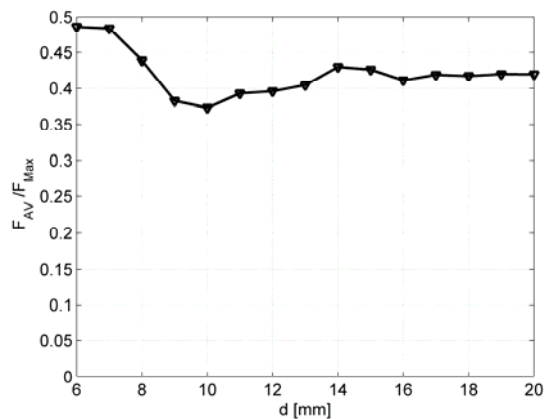
Wykonano obliczenia dla szerokości cewek w zakresie 6 mm do 20 mm utrzymując stałą wartość ( $h = 30$  mm) ich wysokości. W przypadku zmian szerokości cewek dokonano też odpowiedniej zmiany szerokości pierścieni ferromag-

netycznych  $n$  (rys. 3b). Szerokość  $m$  magnesów pierścieniowych pozostała bez zmian. Zmieniano także odległości między segmentami.

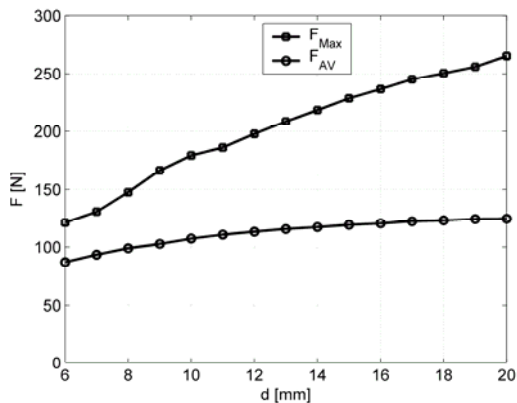
Siła zaczepowa, dla zmieniającej się szerokości cewek, również ulega zmianie, ze względu na jednocześnie zmiany szerokości elementów ferromagnetycznych stojana i biegnika. Zwiększanie szerokości cewek powoduje spadek wartości średniej siły zaczepowej. Wartość maksymalna tej siły początkowo rośnie, osiągając maksimum dla szerokości  $d = (9 \div 10)$  mm, a następnie maleje (rys. 9a). Stosunek obu sił (rys. 9b) osiąga wartość maksymalną dla największych (6 mm) cewek. Dla szerokości większych niż 13 mm stosunek ten pozostaje praktycznie stały (zmiany na poziomie kilku procentów).



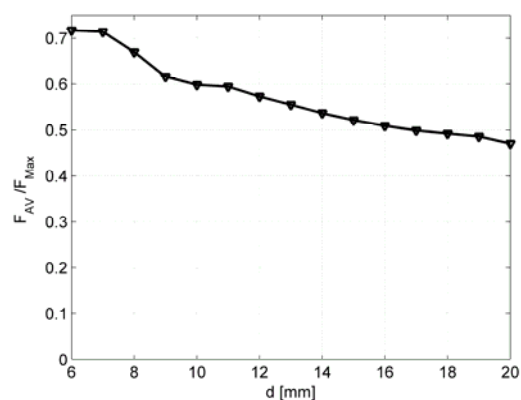
Rys. 9a. Wartość maksymalna i średnia siły zaczepowej.



Rys. 9b. Stosunek średniej siły zaczepowej do maksymalnej.



Rys. 10a. Wartość maksymalna i średnia siły przy wymuszeniu znamionowym



Rys. 10b. Stosunek średniej siły znamionowej do jej wartości maksymalnej



Siła znamionowa rośnie dla zwiększającej się szerokości cewek. Jest to związane z większym wzbudzeniem dla całego uzwojenia, przy zachowaniu stałej gęstości prądu w cewkach. Zależność siły znamionowej od szerokości cewek jest inna niż w przypadku siły zaczepowej. Średnia wartość tej siły wzrasta nieznacznie wraz z szerokością cewek (o około 30 %, rys. 10a). Większym zmianom podlega z kolei wartość maksymalna, która rośnie przy zmianie szerokości z 6 mm do 20 mm o około 110 %. Znajduje to odzwierciedlenie w stosunku obu sił, (rys. 10b), który maleje o około 30 % od wartości 0,71 do 0,48.

## 5. WNIOSKI

---

Zmiana szerokości  $d$  cewek, z jednoczesną zmianą szerokości elementów ferromagnetycznych, powoduje zmianę siły zaczepowej, pochodzącej od magnesów trwałych biegnika. Zmian tych nie obserwuje się w przypadku segmentów stojana o różnej wysokości wymuszonej zmianą wysokości  $h$  uzwojenia.

Wysokość ta nie wpływa na wartość siły zaczepowej silnika. Wpływa natomiast na wartość siły znamionowej, co wynika ze wzrostu przepływu wraz z powiększaniem gabarytów cewek. Wartości sił średnich odniesione do maksymalnych, zarówno dla siły zaczepowej, jak i znamionowej, jedynie nieznacznie zależą od wysokości cewek.

Wzrost wysokości cewek powoduje znaczący wzrost magnetycznej siły ciągu biegnika, podobnie jak wzrost szerokości tych cewek. Wartość maksymalna siły zaczepowej ma ekstremum dla szerokości cewki  $d = 10$  mm. Zwiększanie szerokości cewki powyżej 10mm powoduje spadek siły zaczepowej. Jednocześnie wzrasta wartość średnia i maksymalna siły znamionowej, co skutkuje zwiększeniem sterowności silnika. Wraz ze wzrostem szerokości cewki zmniejsza się nieco stosunek wartości średniej do wartości maksymalnej siły ciągu.

## LITERATURA

1. Baker N. J., Mueller M. A., Tavner P. J., Ran Li: "Prototype development of direct-drive linear electrical machines for marine energy converters", World Renewable Energy Congress (WREC), 2005, Elsevier Ltd., pp. 271-276.
2. Basak A.: „Permanent-magnet DC linear motors”, Oxford, Clarendon Press, 1996.
3. Eastham J.F., Profumo F., Teneoni A., Gianolio G.: "Linear drive in industrial application: state of the art and open problems", ICEM, Brugge, Belgium, August 25-28, 2002, paper no. 620.

4. Gieras J.: „Silniki indukcyjne liniowe”, WNT, Warszawa, 1990.
5. Pawluk K., Szczepański W.: „Silniki elektryczne liniowe”, Warszawa, WNT, 1974.
6. Tomczuk B., Waindok A.: „Magnetic field calculations of a permanent magnet tubular linear motor (PMTLM)”, X Konferencja ZkwE, Poznań, 18-20 kwiecień, 2005, s. 89-90.
7. Tomczuk B., Waindok A.: „Obliczenia parametrów statycznych silnika liniowego tubowego z magnesami trwałymi (PMTLM)”, XLI Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Jarnołtówek, 14-17 czerwiec, 2005, s. 316-320.

*Rękopis dostarczono, dnia 27.02.2007 r.*

**Opiniował: prof. dr hab. inż. Krystyn Pawluk**

EFFECT OF SIZE OF STATOR WINDING  
ON A DRIVING FORCE EXERTED  
BY A TUBULAR MOTOR  
WITH PERMANENT MAGNETS

Bronisław TOMCZUK  
Andrzej WAINDOK

**ABSTRACT** *Effect of a width and height of a stator winding on the cogging and magnetic forces was studied for a permanent-magnet tubular linear motor. The investigated motor is a prototype solution in which the stator winding is divided into five phase coils. The coil size was subject of changing with appropriate changing of stator segments. A value of the current density in the stator coils was kept constant for numerous variants of the design calculations.*