

prof. dr hab. inż. Zdzisław Gosiewski

dr inż. Krzysztof Falkowski

Politechnika Białostocka

mgr inż. Paweł Piskur

Politechnika Koszalińska

ELEKTROMECHANICZNE NAPĘDY LINIOWE

W artykule przedstawiono konstrukcję i wyniki badań napędu liniowego, dla którego bieguny statora są rozdzielone. Każdy z elektromagnesów napędu posiada niezależny obwód magnetyczny. Rozwiązanie takie pozwala uzyskać znaczne prędkości postępowe biegnika napędu liniowego.

ELECTROMECHANICAL LINEAR DRIVES

In the paper there is presented a new conception and investigation of linear drive with separated poles of stator. Each of electromagnets of drive has independent magnetic circuit. This solution leads to the runner of linear drive with significant linear velocity.

1. Wstęp

W systemach mechatronicznych wykorzystuje się elektromechaniczne układy wykonawcze do generowania wymuszeń siłowych (siła, moment) lub wymuszeń kinematycznych (przemieszczenie liniowe lub przemieszczenie kątowe). Do generowania momentu obrotowego wykorzystuje się elektryczne silniki prądu stałego i przemiennego, natomiast do precyzyjnego ustawiania kąтового wykorzystuje się silniki krokowe [1]. Oddzielną grupą są silniki elektryczne wykorzystywane do generacji siły lub precyzyjnego pozycjonowania (ustawiania).

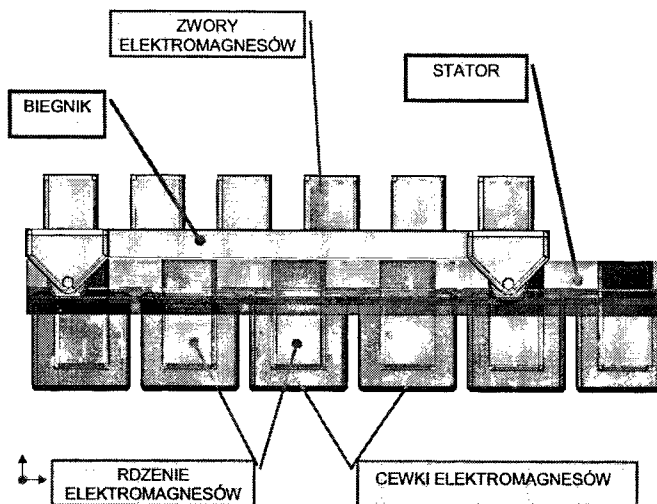
Do generowania ruchu liniowego wykorzystuje się głównie układy elektromechaniczne, które zbudowane są z elektrycznego silnika obrotowego i układu śruba-nakrętka lub elektrycznego silnika obrotowego i paska zębatego. Rozwiązania z wykorzystaniem układu śruba-nakrętka mają szereg wad związanych z ograniczeniem prędkości, wysoką bezwładnością i trudnością wykonania zarówno śruby kulowej jak i prowadnicy [6]. W przypadku przetwarzania ruchu obrotowego na liniowy z wykorzystaniem paska zębatego trudności spowodowane są szybkim zużywaniem się paska. Pasek z czasem rozciąga się i kruszeje. Nie może pracować w styczności ze smarami. Ograniczona jest również dokładność ruchu związana z gęstością zębów. Ponieważ rozwiązania powyższe charakteryzują się szeregiem wad, to poszukuje się innych rozwiązań umożliwiających zwiększenie trwałości i niezawodności napędu liniowego.

W artykule przedstawiona została koncepcja i wyniki badań przeprowadzonych na modelu laboratoryjnym elektromechanicznego napędu liniowego, który umożliwia

generowanie znacznych prędkości liniowych oraz umożliwia precyzyjne ustawienie wirnika [2, 4].

2. Koncepcja liniowego reluktancyjnego silnika elektrycznego

Silnik reluktancyjny jest odpowiednikiem wielosegmentowego wirującego reluktancyjnego silnika skokowego [1, 6]. Rdzenie elektromagnesów wzbudnika i zwory elektromagnesów wykonane są z blachy elektrotechnicznej (rys. 1).



Rys. 1. Budowa silnika liniowego krokowego reluktancyjnego

Na statorze znajdują się elektromagnesy rozmieszczone w równych odległościach. Odległości pomiędzy elektromagnesami są dobrane tak, by uzyskać optymalną wartość siły elektromagnetycznej w płaszczyźnie ruchu. Zasilany elektromagnes generuje siłę F_e , która przyciąga zworę elektromagnesu (rys. 2). Składowa pozioma siły elektromagnesu F przyciąga zworę powodując ruch biegnika. Druga składowa siły elektromagnesu F_a , jest siłą niepożądaną, która dąży do zmniejszenia szczeliny pomiędzy stactorem a biegnikiem [3, 4].

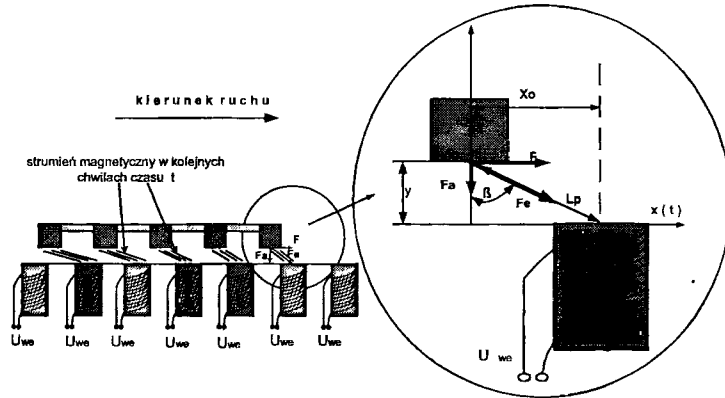
Siła elektromagnetyczna działająca na zworę biegnika oszacowana zostanie metodą energetyczną. W metodzie tej wyznacza się siłę jako pochodną energii względem przemieszczenia. Energia pola magnetycznego E_m , w szczelinie między elektromagnesem a zworą wynosi [5]:

$$E_m = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 dv \quad (1)$$

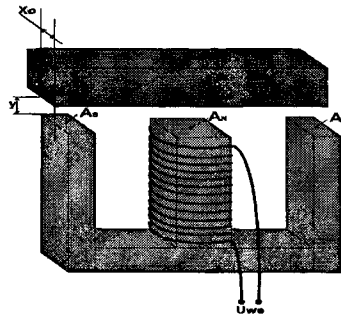
gdzie: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] przenikalności magnetyczna próżni, B – indukcja magnetyczna w szczelinie powietrznej, dv – jednostkowy element objętości szczeliny.

Elektromagnes w napędzie liniowym ma kształt litery E, a zwora kształt litery I jak na rysunku 3. Do obliczeń przyjęte zostały założenia:

- braku wzajemnego oddziaływania (przecieków, efektów asymetrii) z innymi sąsiadującymi obwodami magnetycznymi,
- wartość strumienia magnetycznego w obwodzie magnetycznym jest znacznie mniejsza od poziomu nasycenia obwodu magnetycznego,
- wartość początkowego przesunięcia zwory względem elektromagnesu w płaszczyźnie poziomej $x_0 = 0$.



Rys. 2. Schemat działania silnika liniowego



Rys. 3. Elementarny obwód magnetyczny

Energia pola magnetycznego jest równa sumie energii pod biegunami S i biegunem N (rys. 3):

$$E_m = \frac{B^2}{2\mu_0} [2A_S y + A_N y], \quad (2)$$

gdzie: y – jest szerokością szczeliny pomiędzy elektromagnesem i zwojami; A_N , A_S – są odpowiednio powierzchniami przekroju bieguna północnego i biegunów południowych.

Ponieważ $A_N = 2A_S$, to wartość energii jest równa:

$$E_m = \frac{B^2 y A_N}{\mu_0} \quad (3)$$

Reluktancja obwodu magnetycznego R_0 równa jest sumie reluktancji szczeliny powietrznej pod nabiegownikami R_0 i reluktancji ferromagnetycznej części obwodu magnetycznego R_μ :

$$R_C = 2R_0 + R_\mu \quad (4)$$

Względna przenikalność magnetyczna dla miękkiej stali ma dużą wartość wynoszącą 6000 – 10000, stąd reluktancja w szczelinach powietrznych jest znacznie większa niż w ferromagnetycznej części obwodu [5]:

$$R_C \cong 2R_0 = \frac{2y}{\mu_0 A_N} \quad (5)$$

Strumień magnetyczny ϕ w szczelinie powietrznej, jest równy:

$$\phi = \frac{zi}{R_C} = \frac{zi\mu_0 A_N}{2y}, \quad (6)$$

gdzie: i - prąd płynący przez cewkę elektromagnesu, z - liczba zwojów cewki elektromagnesu. Stąd indukcja magnetyczna B_m będzie wynosiła:

$$B = \frac{\phi}{A_N} = \frac{zi\mu_0}{2y} \quad (7)$$

Uwzględniając (7) w (3) oszacujemy energię w szczelinie powietrznej:

$$E_m = \frac{z^2 i^2 \mu_0 A_N}{4y^2} \quad (8)$$

Siła generowana w szczelinie jest pochodną energii względem przemieszczenia:

$$F_e = \frac{-dE_m}{dy} = \frac{z^2 i^2 \mu_0 A_N}{4y^2} \quad (9)$$

Siła ta rozkłada się na składową poziomą F_a i pionową F . Ruch biegnika jest wywołany składową poziomą (rys. 2).

Rzeczywista odległość nabiegowników elektromagnesów od zwory L_p wynosi (rys. 2) [3, 4]:

$$L_p = \sqrt{y^2 + x_0^2}, \quad (10)$$

stąd składowa siły elektromagnetycznej w płaszczyźnie ruchu biegnika F jest równa:

$$F = \frac{\mu_0 A_N (iz)^2}{4L_p^2} \sin \beta \quad (11)$$

Zgodnie z rysunkiem 3:

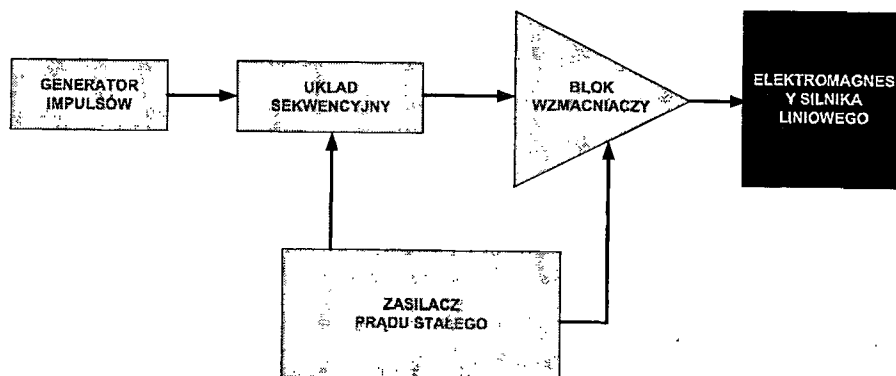
$$\sin \beta = \frac{x_0}{L_p} = \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y^2}}. \quad (12)$$

Uwzględniając 12 w 11, oszacujemy wartość składowej poziomej siły elektromagnesu [4]:

$$F = \frac{1}{4} \mu_0 A_N (iz)^2 \frac{x_0}{(x_0 + y)^2}. \quad (13)$$

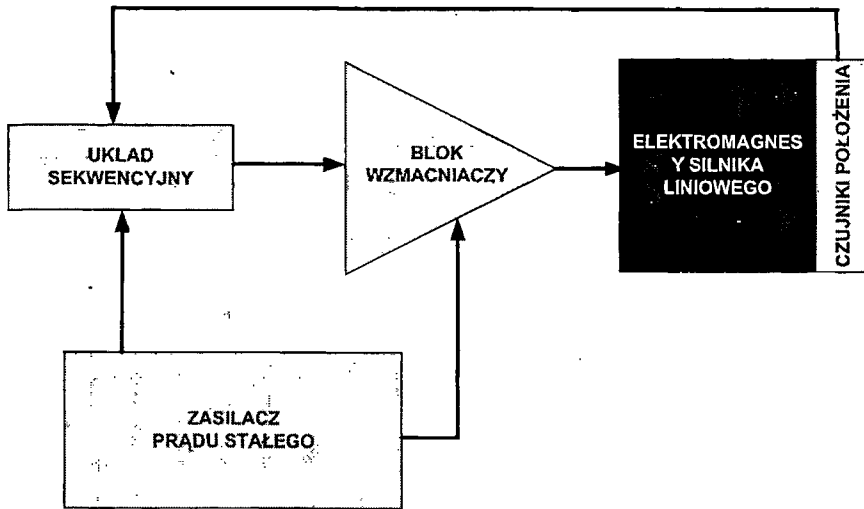
3. Układ sterowania napędu liniowego

Decydując o kolejności zasilania poszczególnych elektromagnesów, można programować ruch biegnika. Elektromagnesy mogą być tak sterowane przez impulsy prądu, by przyspieszały lub hamowały biegnik. Podczas pracy napędu może być zasilany pojedynczy elektromagnes lub kilka elektromagnesów. Tym samym możemy uzyskać różne zakresy pracy napędu i wszystko zależy od przyjętego algorytmu. Biegnik można precyzyjnie zatrzymać w określonym położeniu oraz utrzymać stałe, określone położenie biegnika. Napęd można tak zaprogramować, aby wykonywał odpowiedni ruch z uwzględnieniem etapów przyspieszania o różnych wartościach oraz hamowania. Uzyskanie powyższych właściwości użytkowych jest możliwe po zastosowaniu odpowiedniego układu sterowania [4].



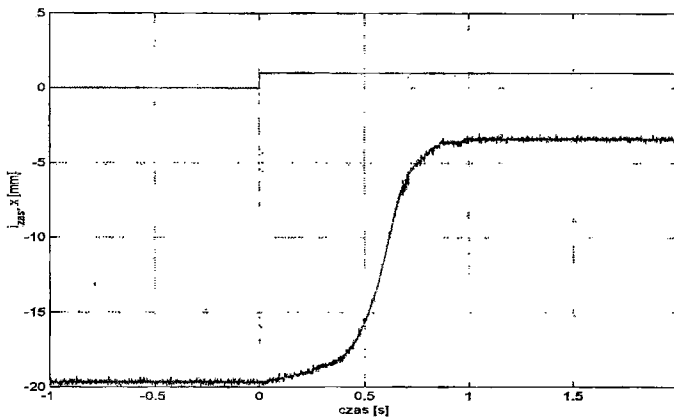
Rys. 4. Otwarty układ sterowania

W rozpatrywanym napędzie mogą być wykorzystane dwa typy układów sterowania. Pierwszym jest otwarty układ sterowania (rys. 4), w którym zastosowano układ sekwencyjny do zaprogramowania ruchu biegnika. W tym układzie sterowania nie można precyzyjnie ustawić biegnika. Jednak w wielu zastosowaniach taki układ sterowania jest wystarczający (np. napędy liniowe wykorzystywane w systemach transportowych).



Rys. 5. Zamknięty układ sterowania

Do precyzyjnego sterowania położeniem biegnika należy wprowadzić czujniki określające położenie biegnika względem statora, a w układzie sterowania uwzględnić sprzężenie zwrotne od położenia biegnika (rys. 5). Podstawą systemu sterowania jest układ sekwencyjny, który może być zrealizowany z wykorzystaniem sterowników PLC lub zaprojektowany jako układ FPGA w bardziej złożonych aplikacjach.



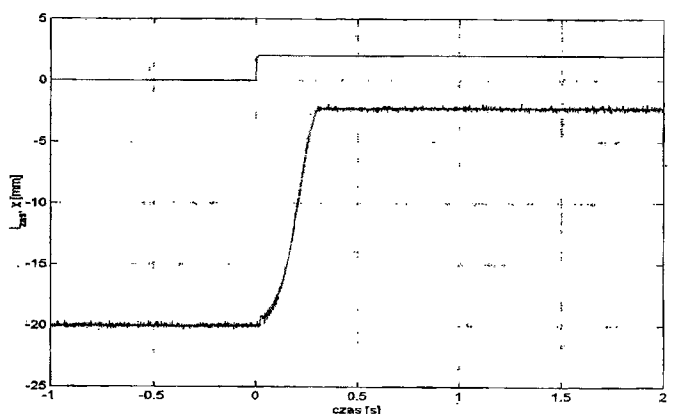
Rys. 6. Odpowiedź biegnika na skok jednostkowy natężenia prądu w jednym elektromagnesie ($i = 1$ [A], szczelina $y = 3$ [mm], $x_0 = -20$ [mm]).

4. Badanie modelu napędu liniowego [4]

Korzystając z przedstawionej wcześniej koncepcji zbudowany został model napędu liniowego, który poddano badaniom eksperymentalnym. W ramach badań wyznaczono:

- przemieszczenie biegnika powodowane skokiem jednostkowym prądu zasilającego cewki elektromagnesu dla różnych wartości przemieszczenia początkowego biegnika, oraz różnych szczelin powietrznych (odległość biegnika od statora),
- zaprogramowany ruch wahadłowy wykonywany przez biegnik.

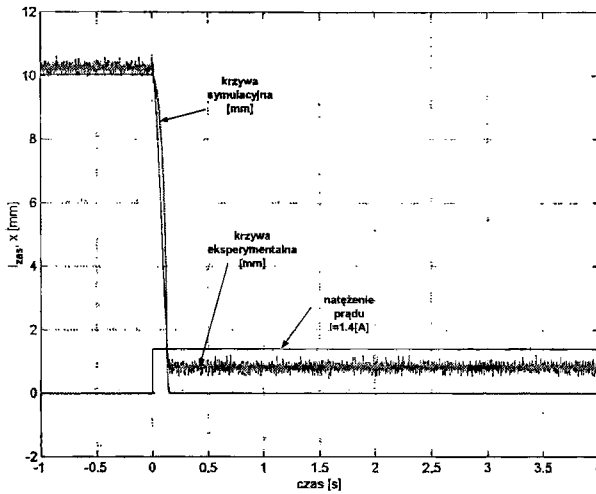
Badania wykonano dla otwartego układu sterowania. Na rysunku 6 i 7 przedstawione są przemieszczenia biegnika przy skokowym zasilaniu pojedynczego elektromagnesu, dla różnych wartości prądu płynącego w cewkach elektromagnesów. Na rysunku 8 przedstawione jest porównanie wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych. Biegnik podczas wykonywania eksperymentu nie eliminował uchybu, co występuje w modelu symulacyjnym (rys. 8). Przyczyna leży w sile tarcia występującej w kołach utrzymujących biegnik w stałej odległości od nabiegunków statora.



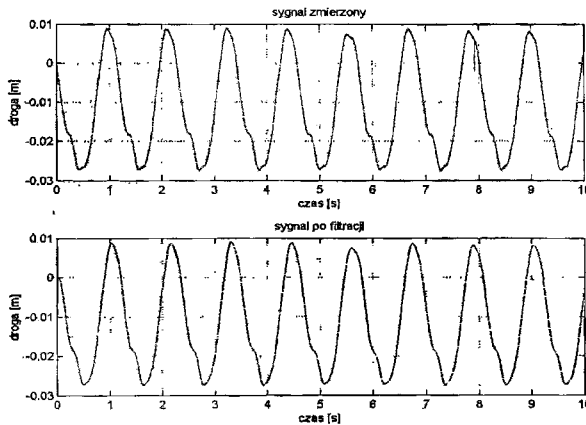
Rys. 7. Odpowiedź biegnika na skok jednostkowy natężenia prądu w jednym elektromagnesie ($i = 2$ [A], szczelina $y = 5$ [mm], $x_0 = -20$ [mm]).

Na rys. 9 i 10 przedstawione jest przemieszczenie i prędkość biegnika przy zamodelowaniu ruchu wahadłowego. Elektromagnesy zasilane były impulsami prądu o wartości 1 [A] i częstotliwości 7 [Hz]. Biegnik wykonywał ruch pomiędzy położeniami skrajnymi statora. Analizując zmianę prędkości biegnika (rys. 10) można dokładnie oszacować jak zmienia się droga biegnika, w których punktach następuje przyspieszanie i opóźnianie biegnika. Również analiza widmowa pozwala na ocenę ruchu biegnika

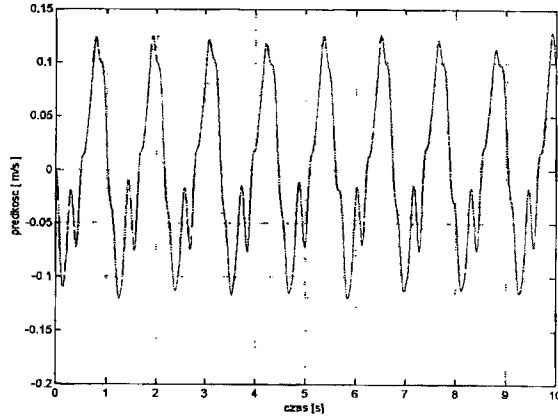
(rys. 11). Biegnik wykonywał ruch harmoniczny z częstotliwością 0.9 [Hz] przy częstotliwości impulsów zasilających 7 [Hz]. Badanie dla większych częstotliwości było niemożliwe ze względu na zbyt małe rozmiary modelu.



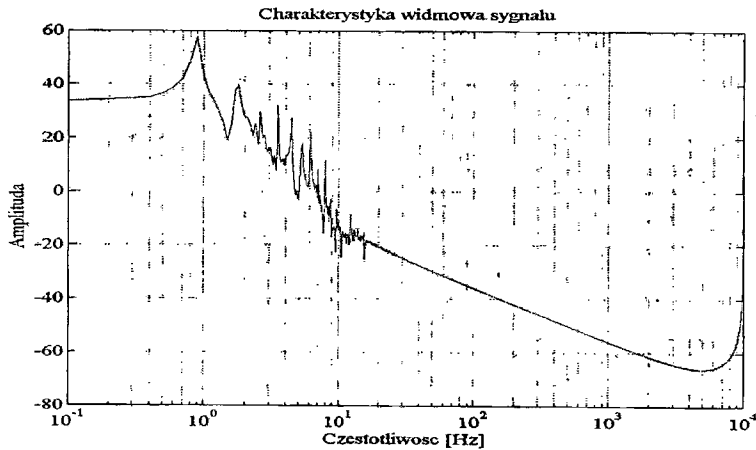
Rys. 8. Porównanie wyników symulacyjnych z wynikami eksperymentalnymi ($i = 1,4$ [A], szczelina $y = 3$ [mm], $x_0 = 10$ [mm]).



Rys. 9. Przeszczenie biegnika w funkcji czasu dla częstotliwości impulsów sterujących o częstotliwości $f=7$ [Hz].



Rys. 10. Prędkość biegnika dla częstotliwości impulsów sterujących $f = 7$ [Hz].



Rys. 11. Analiza widmowa przemieszczenia biegnika dla częstotliwości impulsów sterujących $f = 7$ [Hz].

5. Podsumowanie

Projektując napęd liniowy należy dobrać optymalne wartości szczeliny powietrznej, znamionową wartość skoku, natężenie prądu oraz częstotliwość zasilania elektromagnesów. Przeprowadzone badania eksperymentalne miały na celu pokazanie wpływu poszczególnych wielkości na jakość ruchu oraz korelacje między tymi wielkościami. Zastosowana stabilizacja natężenia prądu zasilaczy pozwala ograniczyć wpływ bezwładności cewek elektromagnesów.

Prędkość biegnika dla pojedynczego skoku zależy od natężenia prądu, wartości początkowej przesunięcia i szczeliny powietrznej. Dla badanego silnika optymalna wartość częstotliwości dla ruchu wahadłowego wynosi $f = 7$ [Hz]. Uzyskana częstotliwość ruchu wahadłowego biegnika wynosiła 0,9 [Hz]. Składowa harmoniczna przemieszczenia dla częstotliwości 1,9 [Hz] (rys. 11), wywołana jest poprzez niewielką asymetrię działania jednego z elektromagnesów. Pozostałe składowe harmoniczne nie wpływają znacząco na charakter ruchu napędu.

Przedstawione rozwiązanie pozwala uzyskać znaczne prędkości liniowe, dlatego jedną z propozycji wykorzystania napędu jest rozpędzania podczas startu promów kosmicznych [4].

Zaproponowany napęd liniowy wymaga dalszych precyzyjnych badań, szczególnie rozwiązanie z zamkniętym układem sterowania. Badania symulacyjne potwierdzają zastosowanie napędu liniowego do precyzyjnego pozycjonowania biegnika, jednak dopiero badania eksperymentalne w pełni zweryfikują powyższe założenia.

Literatura:

- [1] J. Gieras „Silniki liniowe indukcyjne” PWN Warszawa 1986
- [2] P. Piskur „Projekt skokowego silnika liniowego reluktancyjnego”, VI Sympozjum Naukowe: Sterowanie i Monitorowanie Układów Przemysłowych, materiały konferencyjne, Lublin, 9 – 10 maja 2003r.;
- [3] P. Piskur „Design of linear stepping reluctance motor” Student’s scientific conference “CERC 2003” Mater. Konf. Bukareszt 15 – 16 maja 2003.
- [4] P. Piskur “Opracowanie modelu laboratoryjnego liniowego silnika krokowego”, praca magisterska pod kierownictwem dr inż. K. Falkowskiego, Warszawa 2004.
- [5] H. Rawa „Elektryczność i magnetyzm w technice” PWN Warszawa 1994r.
- [6] T. Wróbel „Silniki skokowe” Warszawa 1993.