

Mark CZASZKO, Oleg PIENKOW
Politechnika Doniecka (DPUT)

ZASADA DZIAŁANIA I PODSTAWOWE WŁAŚNOŚCI GRADIENTOWEGO SILNIKA LINIOWEGO PRĄDU STAŁEGO

Streszczenie. Przedstawiono uproszczony opis konstrukcji i zasadę działania gradientowego silnika liniowego prądu stałego, wykonującego ruch części ruchomej do ściśle określonego punktu. Wyznaczono prędkość i drogę przebytą przez część ruchomą oraz zależność tej drogi od rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej silnika. Podano podstawowe właściwości ruchowe wykonanego silnika modelowego.

PRINCIPLE OF PERFORMANCE, CONSTRUCTION AND ESSENTIAL PROPERTIES OF GRADIENT MOTOR

Summary. This paper presents a simplified description, construction and performance principle of an induction machine supplied by direct current source. This motor is used to move the load to a definite point. In the paper a method of calculation of motion parameters is presented. Obtained results can be applied to analyse the properties of the motor and design its control system.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ГРАДИЕНТНОГО ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Резюме. Объектом исследования является устройство обеспечивающее поступательное перемещение магнитным полем контейнера с полезным грузом. Создана методика расчета параметров градиентного двигателя. Рассчитана, изготовлена и исследована модель градиентного двигателя. Сделаны выводы о работоспособности устройства.

1. WPROWADZENIE

Przemieszczenie elementów wykonanych z materiału magnetycznego lub materiału przewodowego na określoną odległość w wielu przypadkach jest realizowane za pomocą liniowych silników indukcyjnych. Jako źródła zasilania tych silników wykorzystywane są zespoły elektromaszynowe lub przekształtniki tyrystorowe. Różnice w rozwiązaniach konstrukcyjnych silników oraz źródeł zasilania i ewentualnych układów sterowania wynikają z konkretnych wymagań stawianych takim napędem przez różne procesy technologiczne.

W ostatnich latach w literaturze technicznej są przedstawione komunikaty o możliwości otrzymania ruchu posuwisto-zwrotnego części ruchomej przy zasilaniu silnika liniowego indukcyjnego z kolejnych sekcji indukcyjnych układów magazynowania energii [1]. Ruch postępowy elementu ruchomego takiego silnika odbywa się w wyniku działania sił elektrodynamicznych, powstających przy załączaniu kolejnych zasobników indukcyjnych do uzwojenia induktora. Takie rozwiązanie techniczne ma następujące wady:

- liczba indukcyjnych zasobników energii jest uzależniona od współrzędnych punktu, do którego ma zostać przemieszczona część ruchoma silnika,
- występują straty energii w łącznikach przy przełączaniu poszczególnych sekcji indukcyjnego zasobnika energii do uzwojenia silnika.

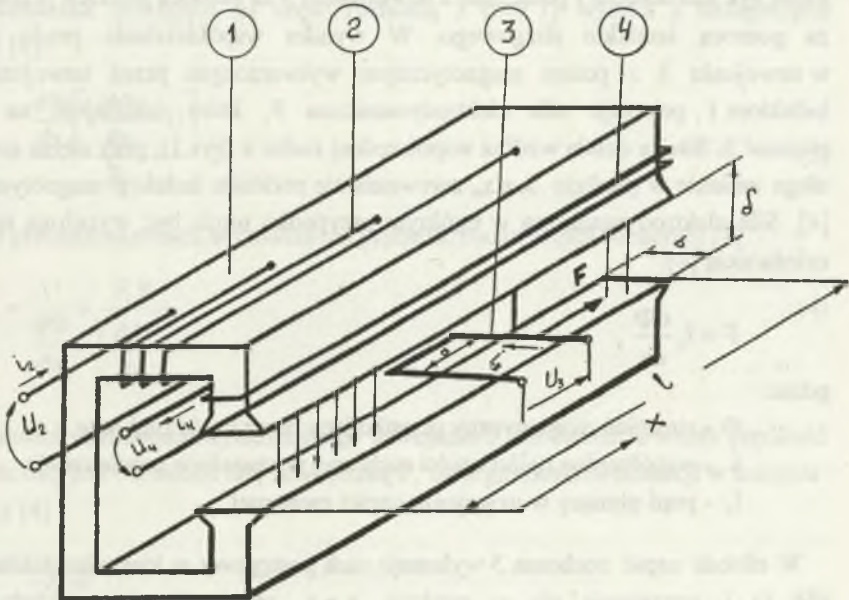
Do chwili obecnej nie dokonano ostatecznej oceny pracy silników indukcyjnych liniowych przy takim zasilaniu w przypadku, gdy silniki są przeznaczone do przemieszczenia ładunków o dużej masie.

W niniejszej pracy przedstawiono silnik umożliwiający ruch postępowy części ruchomej do określonego punktu przez zagwarantowanie odpowiedniej zmiany rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej silnika wzdłuż kierunku ruchu. Istotną cechą takiego rozwiązania jest znaczne uproszczenie sposobu zasilania; nie występuje konieczność stosowania przełączalnych indukcyjnych zasobników energii. Takie urządzenie, nazywane w niniejszej publikacji "silnikiem gradientowym", ma w induktorze dwa uzwojenia izolowane galwanicznie, które są zasilane z dwóch niezależnych źródeł: obydwa - napięcia stałego lub jedno - napięcia stałego, zaś drugie - napięcia przemiennego. Równania opisujące pracę takiego silnika przedstawiono w [2] i [4]. W pracy niniejszej zostanie przedstawiona zasada działania oraz podstawowe własności i wyniki badań silnika modelowego.

2. ZASADA DZIAŁANIA I PODSTAWOWE WŁASNOŚCI SILNIKA GRADIENTOWEGO

Silnik gradientowy (rys.1) składa się z induktora 1, uzwojeń induktora 2, 4 oraz elementu ruchomego 3 z uzwojeniem. Uzwojenie 2 jest tak rozmieszczone w induktorze 1, aby rozkład indukcji magnetycznej pola wykazywał w szczelinie powietrznej silnika gradient w kierunku ruchu elementu ruchomego 3. Wielkość gradientu indukcji magnetycznej jest zależna od sposobu rozmieszczenia uzwojenia 2 induktora 1 i prądu płynącego w tym uzwojeniu. Zasilanie uzwojeń silnika gradientowego może być zrealizowane następująco:

- zasilane są wszystkie uzwojenia 2, 3 i 4 (rys 1) ze źródeł napięcia stałego,
- zasilane jest uzwojenie 2 ze źródła napięcia stałego, uzwojenie 4 ze źródła napięcia przemiennego, zaś uzwojenie 3 części ruchomej nie jest zasilane (zwarne na zaciskach).



Rys. 1. Przekrój uproszczony silnika gradientowego

Fig. 1. Cross-section of gradient motor

2.1. Praca silnika gradientowego przy zasilaniu uzwojeń ze źródeł napięcia stałego

Przy takim sposobie zasilania uzwojenie 2 (rys. 1) wytwarza w szczelinie powietrznej pole magnetyczne o zmiennym rozkładzie indukcji magnetycznej wzdłuż współrzędnej x , stosownie do rozmieszczenia tego uzwojenia w rdzeniu induktora 1 (rys.1), przy czym wartość indukcji maleje w miarę wzrostu wartości współrzędnej x . Uzwojenie 4 wytwarza stałe pole magnetyczne wzdłuż współrzędnej x . Wypadkowe pole magnetyczne w szczelinie powietrznej δ wynika z sumowania pól magnetycznych uzwojeń 2 i 4. Zmieniając warunki zasilania uzwojenia 4 (tzn. wartość i kierunek prądu I_4 - rys.1), przy niezmiennych warunkach zasilania uzwojenia 2, można kształtować rozkład indukcji magnetycznej $B(x)$ pola magnetycznego w szczelinie powietrznej w ten sposób, aby rozkład ten zmieniał znak w wymaganym punkcie $x = x_0$.

Prąd płynący w uzwojeniu 3 części ruchomej jest wymuszany przez zasilanie ze źródła napięcia stałego, które może przemieszczać się razem z elementem 3 lub może być nieruchome i połączone z uzwojeniem 3 za pomocą giętkich przewodów lub za pomocą kontaktu ślizgowego. W wyniku współdziałania prądu płynącego w uzwojeniu 3 z polem magnetycznym wytworzonym przez uzwojenia 2 i 4 induktora 1 powstaje siła elektrodynamiczna F , która oddziałuje na ruchomy element 3. Siła ta działa wzdłuż współrzędnej ruchu x (rys.1), przy czym znak tej siły ulega zmianie w punkcie $x = x_0$ zerowania się rozkładu indukcji magnetycznej $B(x)$, [4]. Siła elektrodynamiczna w ogólnym przypadku może być wyrażona następującą zależnością [4]:

$$F = I_3 \frac{d\Phi}{dx}, \quad (1)$$

gdzie:

- Φ - strumień magnetyczny przenikający przez część ruchomą,
- x - współrzędne ruchu części ruchomej w szczelinie powietrznej,
- I_3 - prąd płynący w uzwojeniu części ruchomej.

W efekcie część ruchoma 3 wykonuje ruch postępowy w kierunku działania siły F (rys. 1) i zatrzymuje się w punkcie $x = x_0$ zerowania się rozkładu indukcji magnetycznej $B(x)$. Przy ruchu części ruchomej 3 w jej uzwojeniu indukuje się siła elektromotoryczna. Z równania Kirchhoffa dla obwodu uzwojenia 3 i z bilansu sił działających na część ruchomą otrzymuje się po przekształceniach następującą zależność określającą prędkość ruchu części ruchomej [4]

$$v = \frac{U}{\frac{d\Phi}{dx}} - \frac{F R}{\left(\frac{d\Phi}{dx}\right)^2}, \quad (2)$$

przy czym:

U - napięcie zasilania uzwojenia części ruchomej,

R - rezystancja uzwojenia części ruchomej.

Zależność (2) opisuje charakterystykę zewnętrzną silnika gradientowego w warunkach pracy silnikowej. Z analizy tej zależności wynika, że prędkość części ruchomej można zmieniać przez zmianę warunków zasilania uzwojenia części ruchomej przy stałym gradiencie strumienia magnetycznego, wytworzonego przez uzwojenia 2 i 4 lub odwrotnie, przez zmianę gradientu strumienia magnetycznego w kierunku ruchu przy nie zmienionych warunkach zasilania uzwojenia 3.

W warunkach hamowania prądnicowego silnika gradientowego siła elektrodynamiczna działająca na część ruchomą 3 (rys. 1) wynika z następującej zależności [4]:

$$F_1 = \frac{\frac{d\Phi}{dx} \left[v \frac{d\Phi}{dx} - U \right]}{R}, \quad (3)$$

z której po przekształceniach wyznacza się prędkość ruchu części ruchomej [4]

$$v_1 = \frac{U}{\frac{d\Phi}{dx}} + \frac{F_1 R}{\left(\frac{d\Phi}{dx}\right)^2}. \quad (4)$$

W warunkach hamowania dynamicznego uzwojenie 3 jest zwarte, a wtedy prędkość części ruchomej jest określona siłą zewnętrzną F_1 oraz gradientem indukcji w miejscu hamowania [4]

$$v_d = \frac{F_1 R}{\left(\frac{d\Phi}{dx}\right)^2}. \quad (5)$$

2.2. Praca silnika gradientowego przy zasilaniu jednego z uzwojeń induktora ze źródła napięcia stałego, zaś drugiego ze źródła napięcia przemiennego

Przedstawione w punkcie 2.1 zależności są słuszne w przypadku, kiedy do uzwojenia części ruchomej 3 silnika energia jest przekazywana ze źródła napięcia stałego. Możliwe jest również indukcyjne przekazywanie energii do tego uzwojenia. Przy takim sposobie przekazywania energii uzwojenie 2 jest zasilane tak jak w punkcie 2.1, uzwojenie 4 jest zasilane ze źródła napięcia przemiennego, zaś uzwojenie 3 jest zwarte. Uzwojenie 4 wytwarza w szczeliny powietrznej przemiennie pole magnetyczne o niezmiennym (stałym) rozkładzie w szczeliny powietrznej wzdłuż kierunku ruchu części ruchomej. Przemienne strumień magnetyczny indukuje w części ruchomej 3 siłę elektromotoryczną i w efekcie w uzwojeniu tym płynie prąd I_3 . W wyniku współdziałania prądu I_3 z polem magnetycznym w szczeliny powietrznej powstaje siła elektrodynamiczna, określona zależnością (1), zaś prędkość ruchu części ruchomej wynika z następującego równania [4]:

$$v = \frac{\Phi'}{\frac{d\Phi}{dx}} - \frac{FR}{\left(\frac{d\Phi}{dx}\right)^2}, \quad (6)$$

w którym: $\Phi' = \frac{d\Phi}{dt}$ - szybkość zmian strumienia magnetycznego przenikającego przez element ruchomy 3.

Z zależności (6) wynika, że wartość siły ciągu i prędkość części ruchomej zależy od $\frac{d\Phi}{dx}$, czyli od rozkładu siły magnetomotorycznej uzwojenia 2 oraz od $\Phi' = \frac{d\Phi}{dt}$, czyli od częstotliwości źródła zasilającego uzwojenie 4. Drogę przebytą przez część ruchomą można obliczyć z następującej zależności [4]:

$$x_1 - x_2 = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\frac{d\Phi}{dx}} - \frac{\int FR dt}{\left(\frac{d\Phi}{dx}\right)^2}, \quad (7)$$

w której: x_1, x_2 - współrzędne części ruchomej,

Φ_1, Φ_2 - wartości strumienia magnetycznego przenikającego przez część ruchomą w pozycjach x_1, x_2 .

W zależności (7) drugi składnik określa błąd pozycjonowania. Widać, że błąd ten można zmniejszyć do wartości wynikającej z wymaganej dokładności pozycjonowania przez dobór odpowiedniej wartości gradientu strumienia magnetycznego wzdłuż kierunku ruchu.

3. PARAMETRY ENERGETYCZNE SILNIKA GRADIENTOWEGO

Parametry energetyczne zostaną wyznaczone dla silnika gradientowego, którego uzwojenia 2, 3, 4 są zasilane ze źródeł napięcia stałego. W niniejszej pracy jako parametr energetyczny charakteryzujący własności silnika przyjęto stosunek strat mocy czynnej w uzwojeniach do mocy użytecznej. Można udowodnić, że parametr ten jest zależny od zadanego rozkładu siły ciągu wzdłuż kierunku ruchu. Jako przykład przedstawiono zależność określającą parametr energetyczny dla stałej siły ciągu wzdłuż kierunku ruchu. W takich warunkach pracy parametr energetyczny silnika jest określony następującą zależnością [2]:

$$\frac{p'}{p} = \frac{j\delta l^2 F}{4\gamma \mu_0 ab U_3 I_3^2} = \frac{j\delta l^2}{4\gamma \mu_0 ab v I_3^2}, \quad (8)$$

gdzie: p' , p - moc stracona, moc użyteczna,

j - gęstość prądu,

δ - szerokość szczeliny powietrznej,

l - długość silnika

γ - konduktywność pręta,

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni,

a , b - szerokość i długość elementu ruchomego

Z zależności (8) wynika, że z wydłużeniem (l) silnika rosną względne straty oraz, że straty te maleją w miarę wzrostu prędkości ruchu (v), powiększania rozmiarów elementu ruchomego (a , b) i powiększania prądu I_3 w części ruchomej.

W porównaniu z klasycznym silnikiem liniowym silnik gradientowy posiada tę zaletę, że nie pobiera mocy biernej, co eliminuje związane z nią straty. Można udowodnić, że przy przesunięciu krótkiego ciała na odległość 10 razy większą od jego długości straty mocy czynnej w uzwojeniach silnika gradientowego są o dwa rzędy mniejsze niż moc bierna pobierana przez klasyczny silnik liniowy indukcyjny [5]. Dla napędu o dużej mocy warunek ten posiada decydujące znaczenie.

Decydującym warunkiem przy zastosowaniu silnika gradientowego do przenoszenia ładunków o dużej masie jest masa jego rdzenia i uzwojeń, która stanowi około 90% całkowitej masy silnika. Zależność tej masy od siły ciągu, długości i innych parametrów jest bardzo skomplikowana. Z obliczeń analitycznych [2], [4] wynika, że ze zwiększeniem długości i siły ciągu rośnie masa właściwa silnika na jednostkę

długości i jednostkę siły ciągu. Masa silnika zmniejsza się ze wzrostem prądu płynącego w ruchomej części i zwiększeniem rozmiarów tego elementu. Z obliczeń wynika, że istnieje wartość szerokości szczeliny powietrznej δ (rys.1) ze względu na bezpieczne przemieszczanie ładunku i przy której masa silnika gradientowego jest optymalna.

4. UWAGI KOŃCOWE

Zasada działania i podstawowe charakterystyki ruchowe silnika gradientowego zbadano dla silnika modelowego o następujących podstawowych wymiarach:

- długość rdzenia 0,7 m,
- szczelina powietrzna 10 mm,
- część ruchoma 60×170 mm.

W silniku modelowym gradient indukcji strumienia magnetycznego wynosił ok. 2 Wb/m i wtedy element ruchomy rozwijał siłę ciągu do 20 N i osiągał prędkość do 1,5 m/s.

Z analizy wyników symulacji komputerowej [2], [3] i przeprowadzonych badań [5] wynikają następujące wnioski:

- jest możliwe wykonanie silnika liniowego gradientowego, którego zasada działania wynika z oddziaływania pola magnetycznego o niestałym rozkładzie wzdłuż kierunku ruchu na uzwojenia z prądem,
- podstawową zaletą silnika gradientowego jest brak poboru mocy biernej oraz możliwość pozycjonowania ruchu części ruchomej,
- przy przesunięciu ładunków o dużej masie na określoną odległość silnik gradientowy wykazuje lepsze własności elektryczne i trakcyjne niż klasyczny silnik liniowy indukcyjny.

Obliczenia analityczne i wyniki badań będą wykorzystane przy realizacji silnika gradientowego, który powinien zapewnić rozruch kontenera o masie 20 t z przyspieszeniem do 30 m/s² i kompensację aerodynamicznego oporu ruchu na długości 500 m, przy zmianach prędkości w zakresie (0 ÷ 100) m/s.

LITERATURA

- [1] Glebow I., Rutberg F.: Sinchronnyje generatory kratkowremennogo i udarnogo dejstwija. "Nauka", Leningrad 1985.
- [2] Czaszko M.: Razrabotka i issledowanie elektromagnitnogo dwigatelja special'nogo naznaczenija. Konferencja Naukowa, Sewastopol 1992.
- [3] Czaszko M., Pienkov O.: Elektromagnitnyj dwigatel' special'nogo naznaczenija; Konferencja Naukowa, Donieck 1991.
- [4] Dudnik M., Czaszko M.: NIR po sozdaniju elektromagnitnogo dwigatelja special'nogo naznaczenija. Praca Naukowa N 02900013664 DPI, 1989.
- [5] Czaszko M., Pienkov O.: Eksperimental'noje issledowanije makieta dwigatelja special'nogo naznaczenija. Praca Naukowa N 02900046549 DPI, 1990.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ernest Mendrela

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1994 r.

Abstract

The linear induction motor supplied by direct current source is investigated. This motor is used to move the large load up to a definite point. The main aim is to propose a method of estimation of some motion parameters and check up calculation results on the model of the gradient motor.

The gradient motor consists of: core 1, windings 2, 4 and moving part 3 (Fig.1). The windings 2, 4 generate two magnetic fields. Configuration, gradient of electromagnetic induction and other properties of magnetic fields are determined by voltage and construction of the windings 2. Two different kinds of supply are used: direct current sources and combination of direct and alternative sources.

The performance principle of the gradient motor contains in the co-operation between electrodynamic force F according to (1) and current I_3 . The velocity of the moving element 3 is described by equations (2, 4 ÷ 6). Displacement of the moving part 3 is described by equation (8).

The performance principle of the gradient motor contains in the co-operation between electrodynamic force F according to (1) and current I_3 . The velocity of the moving element 3 is described by equations (2, 4 + 6). Displacement of the moving part 3 is described by equation (8).

The control of motion parameters can be realized by changing supply conditions of an inductor winding and the moving part winding.

In the experiment, motion parameters obtained from the model of the gradient motor are: velocity 1,5 m/s and force 20 N.

Analytical analysis and experimental results will be used to construct a gradient motor, which enables a soft start of a 20 t container with acceleration of max. 30 m/s² and aerodynamic resistance compensation on the 500 m distance with the speed changes in the range of (0 + 100) m/s.