

Barbara ŚLIWA

Instytut Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej
Politechniki Śląskiej

ZASTOSOWANIE SILNIKÓW LINIOWYCH W POMIAROWYCH UKŁADACH NADAŻNYCH

Streszczenie. W artykule omówiono zasadę działania i zalety silnika liniowego prądu stałego w zastosowaniu do pomiarowych układów nadażnych. Przedstawiono również układ automatycznego kompensatora z silnikiem liniowym jako elementem napędzającym.

Do pomiarowych układów nadażnych należą automatyczne mostki i automatyczne kompensatory. W układach tych istotny problem stanowi właściwy dobór silnika napędowego.

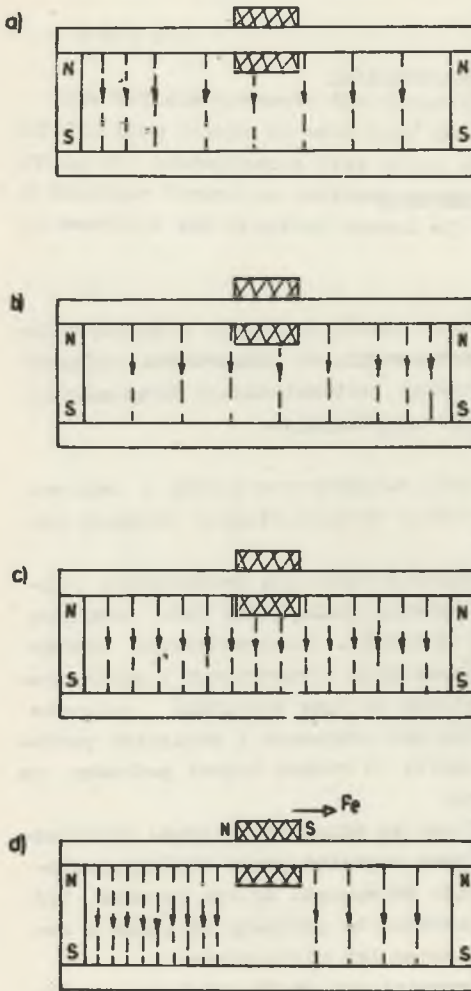
W wielu dotychczasowych układach nadażnych używa się dwufazowych silników prądu przemiennego z wirnikiem kubkowym, gdzie jedna faza zasilana jest wprost z sieci, a druga jest fazą sterującą. W automatycznym mostku faza ta jest sterowana napięciem niezrównoważenia otrzymanywanym z mostka rezystancyjnego. W automatycznym kompensatorze na fazę sterującą podawane jest napięcie będące różnicą między napięciem mierzonym i napięciem porównawczym. Wirnik silnika obraca się do chwili, w której sygnał podawany na fazę sterującą osiąga wartość równą zeru.

Faza sterująca silnika musi być zasilana ze wzmacniacza prądu przemiennego. W przypadku, gdy mierzony sygnał jest sygnałem prądu stałego, zachodzi konieczność zamiany go na sygnał prądu zmiennego. Zmiana ta może być realizowana w sposób mechaniczny, lecz stwarza to problemy związane z zanieczyszczeniami styków i ograniczeniem czasu ich użytkowania.

Dzięki rozwojowi półprzewodnikowych wzmacniaczy prądu stałego o małym dryfcie sygnału wyjściowego można było wyeliminować wzmacniacze prądu zmiennego i wejściowe modulatory. Elementem napędzającym stał się silnik prądu stałego. Stosowanie silnika prądu stałego stwarza nowe problemy związane z komutacją, jak np. iskrzenie, erozja szczotek i właściwy ich dobór ze względu na stosowane prędkości obrotowe.

Niedogodności tych można uniknąć, zastępując konwencjonalny silnik prądu stałego - silnikiem liniowym. W silniku liniowym prądu stałego wyeliminowane są szczotki, a dodatkową zaletą jest liniowy ruch części ruchomej, co ma duże znaczenie w przyrządach rejestrujących.

Zasadę działania silnika liniowego wyjaśnia rys. 1. Bieguny N-N i S-S dwóch magnesów stałych (lub elektromagnesów) połączone są szynami z mięk-



Rys. 1. Zasada działania silnika liniowego prądu stałego

taką samą rolę jak wirnik w silniku wirującym.

Jeżeli pole magnetyczne wytwarzane jest przez elektromagnesy, wówczas wyrażenie na energię pola układu przybiera postać:

$$W = \frac{1}{2} \psi_1 I_1 + \frac{1}{2} \psi_2 I_2 + \frac{1}{2} \psi_3 I_3, \quad (1)$$

gdzie:

ψ_1, ψ_2 - strumienie sprzężone elektromagnesów,

kiego żelaza. Na szynie górnej umieszczona jest cewka ruchoma. Strumienie wychodzące z biegunów N magnesów przechodzą przez górną szynę i zamykają się przez powietrze i szynę dolną. Uzyskanie pola magnetycznego w powietrzu możliwe jest dzięki zorientowaniu biegunów magnesów tak, aby strumienie były skierowane przeciw sobie.

Rys. 1a i 1b pokazują pola magnetyczne, pochodzące od lewego (a) i prawego (b) magnesu. Rys. 1c przedstawia wypadkowe pole w szczelinie powietrznej - będące sumą pól obu magnesów w przypadku, gdy w cewce ruchomej nie płynie prąd. Jest to pole jednorodne pod warunkiem, że można pominąć spadki napięć magnetycznych w żelazie, czyli w przypadku nienasyconego obwodu magnetycznego. Również superpozycja strumieni ma sens jedynie dla obwodu nienasyconego. Przepływ prądu w cewce ruchomej powoduje powstanie jej własnego pola magnetycznego, które dodaje się do pola magnesów po jednej stronie cewki, a odejmuje po drugiej (rys. 1d). W wyniku tego pojawia się siła elektrodynamiczna F_e , wywołująca ruch cewki w stronę osłabionego pola. Cewka ta spełnia

- $\psi_3 = z_3(\Phi_3 + \Phi_2 - \Phi_1)$ - strumień sprzężony cewki ruchomej
 Φ_3 - strumień wytwarzany przez cewkę ruchomą
 z_3 - liczba zwojów cewki ruchomej,
 I_1, I_2, I_3 - prądy płynące w cewkach elektromagnesów i cewce ruchomej (I_3),
 Φ_1 - strumień lewego magnesu sprzężony z cewką ruchomą,
 Φ_2 - strumień prawego magnesu sprzężony z cewką ruchomą

Jeżeli założymy liniową zmianę strumieni sprzężonych z cewką ruchomą w funkcji jej położenia, możemy napisać:

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \frac{\Phi_m}{l} (1 - x) \\ \Phi_2 &= \frac{\Phi_m}{l} x,\end{aligned}\quad (2)$$

gdzie:

- Φ_m - strumień wytwarzany przez jeden magnes (zakładamy, że magnesy są jednakowe),
 l - cały zakres ruchu cewki (długość bieznika),
 x - chwilowe położenie cewki

Względniając wzory (2) otrzymujemy wyrażenie na strumień sprzężony cewki ruchomej w funkcji położenia x :

$$\begin{aligned}\psi_3 &= z_3 \left[\Phi_3 - \frac{\Phi_m}{l} (1 - x) + \frac{\Phi_m}{l} x \right] = \\ &= z_3 \Phi_3 + z_3 \Phi_m \frac{2x - 1}{l}\end{aligned}\quad (3)$$

Po podstawieniu wzoru (3) do wyrażenia na energię pola otrzymujemy:

$$W = \frac{1}{2} \psi_1 I_1 + \frac{1}{2} \psi_2 I_2 + \frac{1}{2} \left[z_3 \Phi_3 + z_3 \Phi_m \frac{2x - 1}{l} \right] I_3 \quad (4)$$

Możemy założyć, że prądy uzwojeń elektromagnesów I_1, I_2 jak również ich strumienie sprzężone ψ_1, ψ_2 są stałe, oraz że strumień Φ_3 wytwarzany przez cewkę ruchomą także nie ulega zmianie.

Zatem:

$$\frac{1}{2} \psi_1 I_1 = \text{const}$$

$$\frac{1}{2} \psi_2 I_2 = \text{const}$$

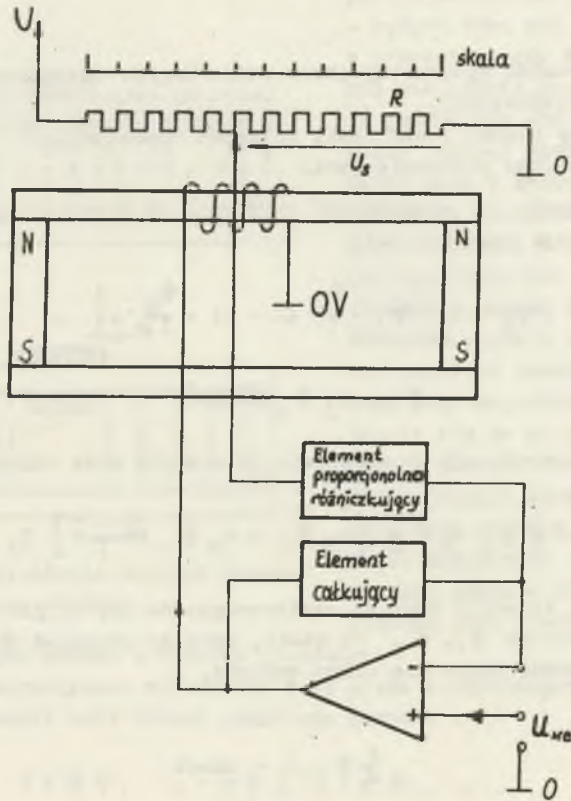
$$\Phi_3 = \text{const}$$

Po zróżniczkowaniu wyrażenia na energię według x , przy powyższych założeniach, otrzymamy wzór na siłę elektrodynamiczną działającą na cewkę ruchomą

$$F_e = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{1}{2} z_3 \Phi_m I_3 \frac{2}{l} = \frac{\Phi_m}{l} z_3 \cdot I_3 \quad (5)$$

Z otrzymanego wzoru wynikają następujące wnioski dotyczące możliwości uzyskania dużej siły elektrodynamicznej:

- Strumień magnetyczny w szczelinie, przypadający na jednostkę długości biełnika ($\frac{\Phi_m}{l}$), powinien być możliwie duży. Osiągnąć to można przez wzrost przepływu elektromagnesów oraz przez zmniejszenie reluktancji obwodu magnetycznego. Ponieważ o wielkości reluktancji decyduje długość szczeliny powietrznej, należy dążyć do jej zmniejszenia.



Rys. 2. Schemat ideowy układu

- Przepływ cewki ruchomej (I_3, z_3) powinien mieć również dużą wartość. W tym przypadku należy projektować cewkę o możliwie dużej liczbie zwojów oraz sterującą nią wzmacniacz o wystarczająco dużym prądzie wyjściowym.

Zastosowanie silnika liniowego w układzie automatycznego kompensatora przedstawia rys.2. Wzdłuż górnej szyny silnika, po której porusza się cewka ruchoma, nawinięty jest równomiernie opornik R. Opornik zaopatrzony jest w przesuwny kontakt sprzężony mechanicznie z ruchomą cewką. Gdy opornik ten załączony jest na stałe napięcie U, to napięcie U_g zbierane z suwaka jest proporcjonalne do pozycji cewki. Cewka jest zasilana napięciem wyjściowym wzmacniacza różnicowego, który porównuje napięcie wejściowe U_{we} z napięciem U_g . W momencie, gdy suwak osiągnie takie położenie, dla którego $U_g = U_{we}$, cewka ruchoma zatrzymuje się. Wszelkie zmiany napięcia wejściowego powodują automatycznie zmianę położenia cewki.

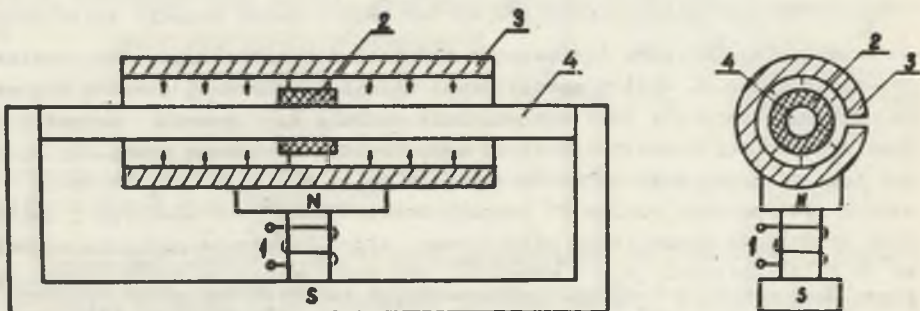
Przy szybkim silniku umożliwiającym dużą prędkość odtwarzania powstaje niebezpieczeństwo, że pod wpływem bezwładności silnika cały mechanizm rejestrujący zacznie drgać wokół położenia równowagi. Jest to niekorzystne zjawisko przedłużające czas odpowiedzi. Zapobiega temu element proporcjonalno-różniczkujący włączony pomiędzy wskaźnik odchylenia (przesuwny kontakt) a wejście wzmacniacza. Napięcie wyjściowe elementu proporcjonalno-różniczkującego w przypadku nierównowagi jest proporcjonalne do położenia styku ślizgowego i prędkości jego ruchu.

Wzmacniacz różnicowy objęty jest sprzężeniem zwrotnym z zastosowaniem elementu całkującego. Ma to na celu tłumienie zakłóceń, które mogą wystąpić na wejściu wzmacniacza, jak również jego zakłóceń wewnętrznych (zmiana parametrów itp.).

W Instytucie Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej wykonano układ automatycznego kompensatora napędzanego silnikiem liniowym. Przeprowadzono szereg prób mających na celu wybór optymalnej konstrukcji silnika liniowego. Ostatecznie zastosowany silnik przedstawia schematycznie rys. 3.

Pole magnetyczne wytwarzane jest przez jeden elektromagnes (1). Strumień magnetyczny przechodzi przez nabiegunnik N, rurę z miękkiego żelaza (3), następnie radialnie wnika poprzez szczelinę powietrzną do bieźnika (4), po którym porusza się cewka (2). W bieźniku strumień rozgałęzia się ku jego przeciwległym końcom i obydwie części strumienia poprzez zewnętrzny obwód magnetyczny wchodzi do bieguna S elektromagnesu.

Takie ukształtowanie obwodu magnetycznego wykazuje szereg zalet. Rura z miękkiego żelaza jest ekranem eliminującym wpływ obcych pól magnetycznych w obszarze wokół bieźnika. Rozwiązanie to pozwala na maksymalne wykorzystanie cewki ruchomej, ze względu na całkowite zanurzenie jej w polu magnetycznym. Przecięcie wzdłuż rury służy do doprowadzenia przewodów zasilających cewkę ruchomą, a również do wyprowadzenia elementów określających jej położenie (wskaźówka, pisak, suwak opornika R - rys. 2). Przecięcie to jest niewielkie i nie ma praktycznie wpływu na rozptył strumienia wzdłuż obwodu magnetycznego.



Rys. 3. Konstrukcja silnika liniowego

Osiągnięta klasa wykonanego przyrządu z opisanym powyżej silnikiem liniowym wynosi 1,5, a przy bardziej precyzyjnym wykonaniu opornika kompensacyjnego R można osiągnąć wyższą klasę. Przyrząd charakteryzuje się brakiem histerezy pomiarowej oraz niezależnością wskazań od wpływu zewnętrznych pól magnetycznych. Ważną zaletą jest również krótki czas odpowiadania.

Prosta konstrukcja układu napędowego, liniowy ruch organu ruchomego (eliminacja przekładni) stwarzają duże możliwości zastosowania układów napędowych z silnikami liniowymi do przyrządów rejestrujących.

LITERATURA

- [1] Loyd R.G., Linear motor for better performance and reliability in instrumentation. Electrical Review Nr 19, 1973.
- [2] Śliwa B. Projekt przetwornika napięcia lub prądu elektrycznego na analogowe przemieszczenie liniowe. Praca dyplomowa. Instytut Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej, 1974.
- [3] Antoń A: Rejestratory elektryczne, WNT Warszawa 1972.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ В СЛЕДЯЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Р е з ю м е

В статье рассмотрены принцип действия и достоинства линейного двигателя в следящих измерительных системах. Представлен также автоматический компенсатор использующий линейный двигатель.

UTILISATION OF LINEAR MOTORS IN POSITIONAL MEASURING SYSTEMS

S u m m a r y

The article describes the working principle and qualities of the d.c. linear motor when used in positional measuring systems. It also presents the automatic compensator with a linear motor as the driving element.