

Piotr Błaszczyk  
Politechnika Łódzka, Łódź

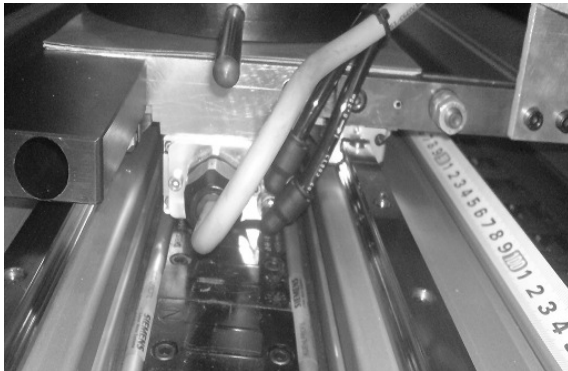
## ANALIZA CHARAKTERYSTYK TRAKCYJNYCH SILNIKA LINIOWEGO SYNCHRONICZNEGO WSPÓLPRACUJĄCEGO Z PRZEMIENNIKIEM CZĘSTOTLIWOŚCI

### THE ANALYSIS OF TRACTION CHARACTERISTICS OF THE LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR COOPERATING WITH FREQUENCY INVERTER

**Abstract:** The paper concerns of the analysis of traction characteristics of the linear synchronous motor (LSM) fed from frequency inverter. The conducted examinations served for the quality assessment of the new type of drive. During attempts and tests of LSM drive was being encumbered with different types of burdens. Received courses were of help for analysis of the drive in terms of his accuracy and the precision. Analysis consisted on comparing with oneself individual stages of the move, for the maximum and minimum load. For every type of the burden a relative error corresponding to the entire sequence of the move was appointed. The conducted examinations confirmed the superiority of the drive, and agreeable parameters with declared by the producer. With evidence of it there is a relative error get in the process of calculations, for the maximum load of the motor, of which the value is on the level 1.5 %.

#### 1. Wstęp

Nowoczesne synchroniczne silniki liniowe znajdują obecnie zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłowych, układach automatyki, w transporcie, a także robotyce.



Rys. 1. Synchroniczny silnik liniowy z wbudowanym układem chłodzenia (opracowanie własne)

Stosowane są coraz częściej, ze względu na porównywalne ceny z napędami liniowymi wykorzystującymi silniki rotacyjne. Przy tym odznaczają się bardzo dobrymi parametrami, umożliwiającymi zwiększanie wydajności na liniach produkcyjnych. Ich niska awaryjność i wysoka trwałość powoduje, że są bardzo konkurencyjne w eksploatacji szczególnie przy długim ich użytkowaniu, [4]. Najczęściej spotykanym w automatyzacji procesów przemysłowych, jest synchroniczny silnik liniowy płaski. Składa się on z dwóch podstawowych części: elektrycznie

wzbudzonej części pierwotnej (siłownik) i części wtórnej (stojan) z magnesami trwałymi, rys.1. W silniku płaskim część pierwotna oddziałuje na część wtórną tylko z jednej strony. Spotyka się również rozwiązania, w których siłownik porusza się między dwoma rzędami magnesów, [2]. Istotnym elementem mającym wpływ na pracę synchronicznych silników liniowych z magnesami trwałymi są nowoczesne elektroniczne układy sterowników i falowników, [1]. Sterownik programowalny potrzebuje niezbędnej informacji o aktualnym położeniu silnika, zatem stanowiska robocze są wyposażone w enkodery liniowe.



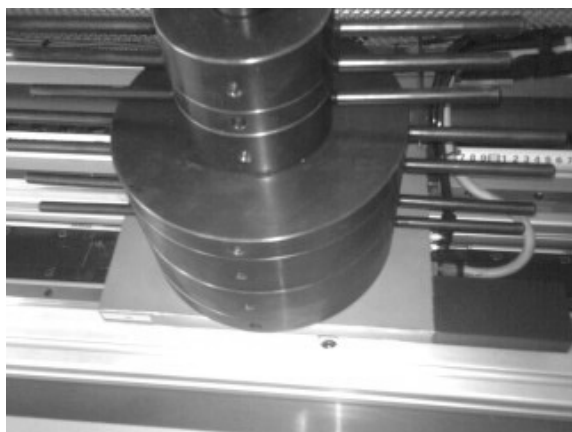
Rys. 2. Szyna robocza z magnesami trwałymi w badanym silniku synchronicznym liniowym

Wymiana informacji pomiędzy układem enkodera i sterownika oraz zdolność całego układu

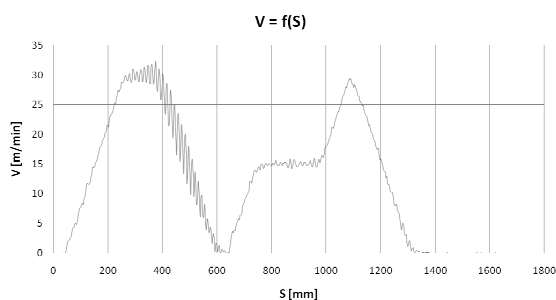
do odpowiedniego reagowania na sygnały, decyduje o właściwościach eksploatacyjnych silnika liniowego.

## 2. Wyniki badań laboratoryjnych

Przedstawiona idea badań obejmuje przejazdy silnika liniowego dla zadanego cyklu pracy uwzględniając stan bez obciążenia i zadanym obciążeniem. Przejazdy z obciążeniem zostały zarejestrowane dla maksymalnej wartości ładunku, nałożonego na uchwyt układu napędowego silnika liniowego. Porównanie charakterystyk silnika dla dwóch stanów pracy: biegu jałowego oraz obciążenia znamionowego, obrazuje elastyczność układu napędowego i przydatność silnika jako elementu wykonawczego. Badania wykonano dla przejazdów silnika z różnymi obciążeniami, zmieniając masę poszczególnych obciążników, aż do obciążenia znamionowego wynoszącego 35kg.



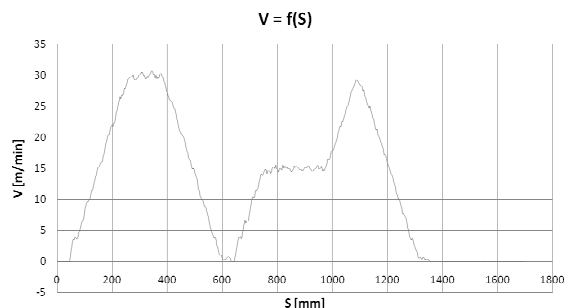
Rys. 3. Silnik liniowy z obciążeniem znamionowym (opracowanie własne)



Rys. 4. Przebieg prędkości w funkcji drogi dla silnika nieobciążonego

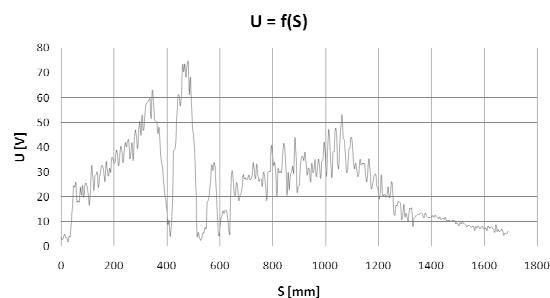
Konstrukcja silnika liniowego wykonawczego zawiera platformę, na której znajduje się jeden z obciążników tzw. wyważeniowy przymocowany na stałe, w celu uzyskania odpowiedniej masy części wtórnej, [3]. Przejazdy silnika odbywały się zgodnie z ułożonym harmonogra-

mem ruchu, przedstawionym na rysunku 4 i kolejnych. Przyjęte do analizy przejazdy silnika liniowego dla stanu jałowego i z obciążeniem, wykonano dla tych samych prędkości i odcinków drogi.



Rys. 5. Przebieg prędkości w funkcji drogi w stanie obciążenia

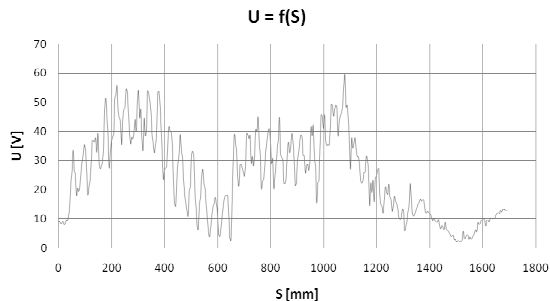
Porównanie przebiegów  $v=f(s)$  z rys. 4 i rys. 5 wskazuje, że poprawną dynamikę pracy silnika liniowego uzyskujemy przy większym obciążeniu mechanicznym. Zarówno dla przebiegu w stanie jałowym jak i obciążenia można zauważyć, że silnik w obu przypadkach uzyskiwał podobne przyrosty prędkości.



Rys. 6. Przebieg napięcia w funkcji drogi dla silnika nieobciążonego

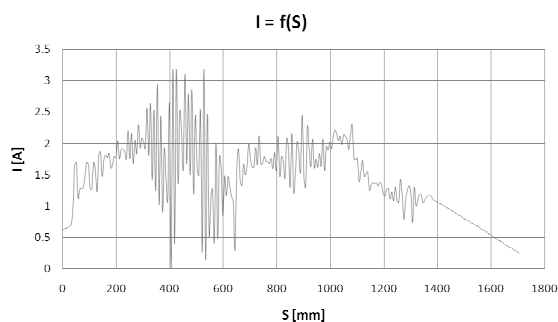
Na przedstawionych przebiegach prędkości wyraźnie widać minimum które daje informację o tym, w którym miejscu nastąpiło chwilowe zatrzymanie silnika przed wykonaniem nawrotu i zmianą kierunku ruchu. Końce poszczególnych zbczy przebiegów wypadają w tych samych miejscach, natomiast silne vibracje dla silnika nieobciążonego widać przy utrzymywaniu zadanej prędkości. Dla dwóch stanów pracy, porównując stromość narastania prędkości do prędkości zadanej, stwierdzono błąd względny na poziomie 1,5%. Przebiegi na rysunkach 6 i 7, przedstawiają zmiany napięcia podczas pracy silnika. Porównując przebiegi uzyskane w stanie jałowym i obciążenia zauważalna jest większa wartość napięcia przyło-

zonego przy ruszaniu silnika w stanie obciążenia. Wiąże się to z wymuszeniem przez sterownik większego przepływu prądu dla uzyskania odpowiednio większej siły posuwu i wypełnienia zadanej sekwencji ruchu.



Rys. 7. Przebieg napięcia w funkcji drogi w stanie obciążenia

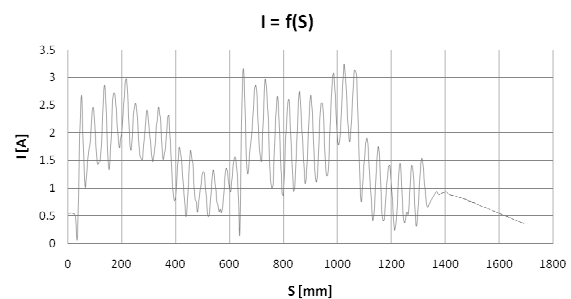
Dla przebiegu napięcia w stanie jałowym na drodze od 400 do 500mm silnik zwalnia, przed rozpoczęciem tego ruchu silnik poruszał się ze stałą prędkością, którą można odczytać z przebiegu 4 gdzie wynosiła ona 30m/min i jest to największa prędkość jaką uzyskano podczas sekwencji ruchu na torze badanego silnika. Na przebiegu zarejestrowanym w trakcie przejazdu z obciążeniem, nie występują tak duże skoki amplitudy napięcia w analizowanym przedziale drogi.



Rys. 8. Przebieg prądu w funkcji drogi dla silnika nieobciążonego

Tak duża wartość napięcia w miejscu przejazdu bez obciążającej masy, ma związek z zadaniem przez sterownik hamowania dynamicznego w celu zwolnienia silnika przed rozpoczęciem nawrotu. Dużo mniejsza amplituda napięcia w analogicznym miejscu podczas przejazdu z obciążeniem wskazuje na to, że do zmniejszenia prędkości silnika podczas przejazdu z obciążeniem wystarcza zadana masa obciążenia i zmniejszenie napięcia zasilającego uzwojenia silnika. Przy porównaniu przebiegów z rysun-

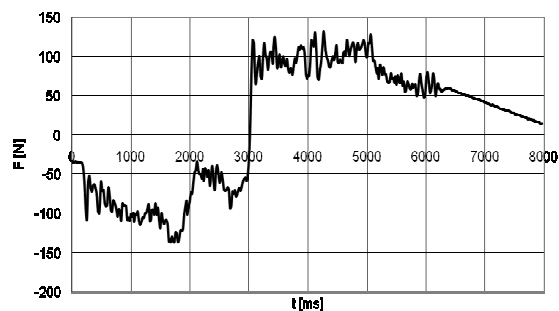
ków 8 i 9, widać wyraźnie większy prąd w stanie obciążenia. Istotnie, duże wartości prądu w stanie jałowym można zaobserwować podczas zwalniania, już po uzyskaniu maksymalnej prędkości ruchu dla zadanej sekwencji ruchu.



Rys. 9. Przebieg prądu w funkcji drogi w stanie obciążenia

### 3. Analiza charakterystyk pracy napędu

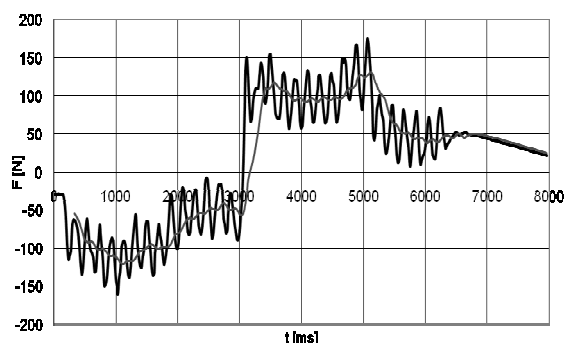
Rysunek 10 przedstawia przebieg uzyskany podczas przejazdu w stanie jałowym bez obciążenia silnika. Przebieg z rysunku 11 zarejestrowany został w czasie trwania przejazdu silnika z obciążeniem masą 35kg.



Rys. 10. Przebieg siły w funkcji czasu w stanie jałowym

W zadanej sekwencji ruchu następowała zmiana kierunku ruchu na przeciwny, stąd odwzorowanie części przebiegu pod osią czasu. Na podstawie wcześniejszych przebiegów można stwierdzić, że zatrzymanie silnika nastąpiło po około trzech sekundach w celu rozpoczęcia ruchu w przeciwnym kierunku. Zarówno w stanie jałowym jak i w stanie obciążenia, możemy zauważyć, że ogólny kształt przebiegów siły zgadza się z przebiegami prędkości  $v=f(s)$ . Przebiegi z rysunków 10 i 11 obrazują wzrost siły odpowiadający zwiększaniu się prędkości silnika, następnie ustabilizowanie się przebiegu podczas biegu ze stałą prędkością. Zmniejszanie się siły elektromagnetycznej ciągu, odpowiada zwalnianie silnika

i spadek prędkości. W przypadku poruszania się silnika w stanie jałowym pokonuje on siłę bezwładności własnej masy oraz opory tarcia.



Rys. 11. Przebieg siły w funkcji czasu w stanie obciążenia z aproksymacją średnią ruchomą

Zatem potrzebna do tego siła ciągu  $F$  będzie mniejsza niż w przypadku przejazdu silnika obciążonego dodatkową masą. Na rysunku 11 przedstawiono przebieg siły  $F$  w stanie obciążenia silnika. Oscylacje amplitudy siły  $F$  zostały uśrednione przy pomocy średniej ruchomej. Oscylacje przebiegu siły  $F$ , widoczne w stanie jałowym i obciążenia mogą być związane z niekorzystnym zjawiskiem Cogging force (tzw. siłą zaczepową). Linie sił pola magnetycznego wytwarzane przez magnesy trwałe zamykają się przez rdzeń części pierwotnej silnika wchodząc przez zęby rdzenia znajdując pozycję równowagi. Podczas poruszania się silnika zmienia się pozycja równowagi, co powoduje powstawanie wspomnianej siły oraz drgań, które mają wpływ na pracę systemu napędowego. Stosowane są różne techniki w celu zmniejszenia wpływu niekorzystnego zjawiska. Można zredukować wpływ tego zjawiska poprzez dobór odpowiedniej długości magnesów, czy też zastosowane w tym układzie skośne ułożenie magnesów. Można tutaj również zastosować zmianę wielkości szczeliny powietrznej lub wprowadzić częściowo zamknięte żłobki. Często są stosowane odpowiednio podzielone uzwojenia fazowe tak, aby uzyskać korzystną liczbę oraz rozmieszczenie zębów rdzenia sekcji pierwotnej.

#### 4. Podsumowanie

Powtarzalność poszczególnych przebiegów, a zwłaszcza dane otrzymane z przejazdów z obciążeniem dowodzą bardzo dobrych parametrów napędu. Potwierdzają one jego świetne właściwości jezdne i dużą precyzję działania przy zadanej mocy, która ma duże znaczenie

w napędach wykonawczych. Pozytywny jest również fakt że przy dużej liczbie przejazdów silnika, tylko sporadycznie wystąpiły błędy w pracy układu i doszło do zatrzymania układu napędowego. Dobre własności napędu zostały potwierdzone także w obliczeniach błędu przejazdów z obciążeniem w stosunku do przejazdów w stanie jałowym, (na poziomie 1,5%). Można zauważyć niewystarczające tłumienie niekorzystnych sił zaczepowych występujących w wyniku interakcji stałego pola magnesów i zębów rdzenia części pierwotnej silnika. Powoduje to powstawanie dodatkowych wibracji oraz objawia się na przebiegach w postaci oscylacji (rys. 4). W trakcie niektórych przejazdów silnika obserwowano wibracje, szczególnie mocne przy przejazdach z obciążeniem. Bardzo duży wpływ na działanie układu napędowego ma rodzaj zastosowanego enkodera. Stanowi on obwód sprzężenia zwrotnego dla układu regulacji położenia i jednocześnie daje informację dla układu regulacji prądu. Właściwości dynamiczne silnika liniowego zależą głównie od prędkości przetwarzania informacji przez procesor sterownika. Bardzo ważny dla sterownika jest czas próbkowania oraz dynamika układu enkodera i jego rozdzielczość.

#### 5. Literatura

- [1]. SIMODRIVE 611 universal Function Manual. Siemens, 04/2006.
- [2]. Siemens Direct Drives of higher dynamic performance and precision. Brochure Siemens, 2005.
- [3]. Linear motors 1FN1/1FN3. Siemens Brochure, September 2005.
- [4]. Gieras J., Piech Z.: *LINEAR SYNCHRONOUS MOTORS Transportation and Automation Systems*. CRC Press, Boca Raton New York Washington, D.C. 2000.

#### Autor

Dr inż. Piotr Błaszczyk, adiunkt w Zakładzie Transportu i Przetwarzania Energii Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej.