

BRONISŁAW DRAK, BRONISŁAW ŚLIWA  
JERZY HICKIEWICZ

Instytut Metrologii  
i Maszyn Elektrycznych

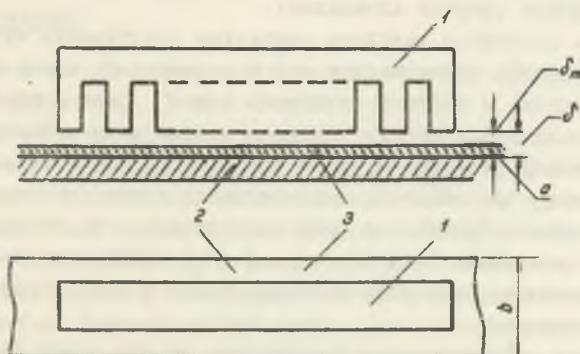
BADANIE WPŁYWU GEOMETRII BIEŻNIKA NA WŁASNOŚCI ROZRUCHOWE  
JEDNOSTRONNYCH INDUKCYJNYCH SILNIKÓW LINIOWYCH

**Streszczenie.** Omówiono własności rozruchowe indukcyjnych silników liniowych jednostronnych w zależności od parametrów bieźnika. Zamieszczono wyniki pomiarów modelowych indukcyjnego silnika liniowego przy różnych parametrach bieźników jednowarstwowych i dwuwarstwowych oraz podano wnioski. Podkreślono celowość takich badań, ponieważ induktory silników liniowych często współpracują z różnymi bieźnikami, których parametry w znacznym stopniu mogą być określone przez urządzenie napędzane.

1. Wstęp

Idea silnika liniowego powstała na przełomie XIX i XX wieku, natomiast praktyczne jej zastosowanie nastąpiło dopiero w latach pięćdziesiątych obecnego stulecia. Pierwsze prace nad wprowadzeniem silników liniowych rozpoczęto w Anglii, gdzie w latach 1956-64 opracowano teoretyczne podstawy do projektowania i konstrukcji tych silników.

Obecnie silnik liniowy znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach transportu wewnętrznego zakładów przemysłowych. Poważnie są również zaawansowane prace nad wprowadzeniem silników liniowych w trakcji. W przyszłości można się spodziewać, że będą one stosowane w innych dziedzinach, jak np. w napędzie obrabiarek (strugarki).

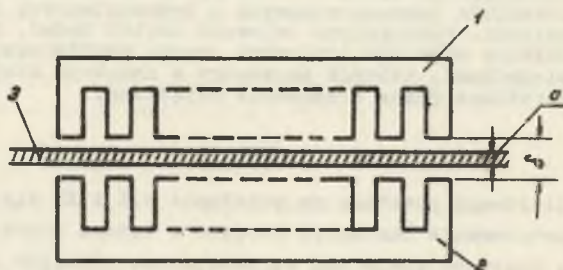


Rys. 1. Silnik liniowy jednostronny

1- induktor, 2 - płyta ferromagnetyczna bieźnika, 3 - nakładka przewodząca bieźnika,  $\delta_m$  - szczelina mechaniczna,  $\delta$  - szczelina magnetyczna

## 2. Zasada działania indukcyjnego silnika liniowego

Silnik liniowy składa się z dwu części (rys. 1). Pierwsza z nich-1 wytwarzająca pole magnetyczne i nosząca zwykle nazwę induktora, jest jak gdyby rozwiniętym stojanem wirującego silnika indukcyjnego. Drugą część, którą w dalszym ciągu nazywać będziemy bieźnikiem, stanowi ferromagnetyczna płaska płyta - 2, którą jest często stalowa konstrukcją nośna np. ceownik lub szyna o odpowiednim profilu. Na płycie ferromagnetycznej umocowana jest nakładka - 3 wykonana z materiału o dobrej przewodności elektrycznej (miedź, aluminium). Płyta ferromagnetyczna, przez którą zamykają się linie pola magnetycznego wytworzonego przez induktor jest odpowiednikiem litego jarzma wirnika silnika indukcyjnego. Nakładka aluminiowa jest jak gdyby rozwiniętym uzwojeniem klatkowym wirnika o nieskończenie wielkiej liczbie prętów.



Rys. 2. Silnik liniowy dwustronny

1,2 - induktor, 3 - płyta przewodząca-bieźnik,  $\delta$  - szczelina magnetyczna

Silnik przedstawiony na rys. 1 nazywamy jest zwykle silnikiem jednostronnym. Istnieją również silniki dwustronne (rys. 2), które posiadają dwa induktory wspólnie wytwarzające pole magnetyczne w szczelinie znajdującej się między nimi. W szczelinie tej umieszczona jest taśma z materiału przewodzącego (zwykle aluminium).

Uzwojenie induktora zasilane napięciem trójfazowym wytwarza magnetyczne pole postępowe, przesuujące się w stosunku do bieźnika z synchroniczną prędkością  $v_0 = 2 f \lambda$ . W wyrażeniu tym  $\lambda$  jest podziałką biegunową silnika a  $f$  częstotliwością napięcia zasilającego. Postępowe pole magnetyczne o liniach prostopadłych do powierzchni bieźnika indukuje w nakładce aluminiowej, jak również na powierzchni płyty ferromagnetycznej prądy wirowe. Działanie dynamiczne pola magnetycznego na strugi prądu w bieźniku powoduje powstanie siły pociągowej ( $F_p$ ), która wywoła ruch induktora względnie bieźnika, zależnie od tego, który z tych elementów będzie miał swobodę poruszania.

Indukcyjny silnik liniowy działa więc na tej samej zasadzie co silnik indukcyjny wirujący. Odmienne wykonanie powoduje jednak różnice własności i charakterystyk. Zasadniczą różnicą jest asymetria obwodu magnetycznego

go jaka cechuje silnik liniowy. Skończona długość silnika powoduje, że fazy których cewki mieszczą się w skrajnych żłobkach, znajdują się w innych warunkach magnetycznych w porównaniu z fazą trzecią. Wynikiem tego są znaczne różnice w wartościach prądów poszczególnych faz. Ponadto na przegmach induktora, oprócz składowych pola postępowego istnieją również składowe pola przemienne, które powodują straty w bieźniku, a poza tym działają hamująco,

Dodatkowym zjawiskiem spowodowanym rozwinięciem stojana jest duża siła naciągu magnetycznego ( $F_n$ ) działającego między induktorem a żelazem bieźnika. Nakładka aluminiowa zmniejsza wartość naciągu magnetycznego, jednak nawet przy dużej grubości nakładki aluminiowej, siła naciągu magnetycznego jest rzędu siły pociągowej.

Ze względów ruchowych, szczelina mechaniczna pomiędzy induktorem a nakładką aluminiową musi być większa od szczeliny powietrznej w silniku wirującym. Ponadto w szczelinie magnetycznej, pomiędzy induktorem a ferromagnetyczną płytą, mieści się jeszcze nakładka aluminiowa. Szczelina magnetyczna, której długość decyduje o wartości prądu magnesującego, jest więc znacznie większa w silniku liniowym. Wynikiem tego jest duży prąd biegu jałowego, wynoszący ok.  $60 \div 70\%$  wartości prądu zwarcia ( $s = 1$ ).

Rezystancja bieźnika jest zwykle znacznie większa niż rezystancja wirnika silnika wirującego. Powoduje to powiększenie poślizgu krytycznego. Jest on zbliżony do jedności, a charakterystyka  $F_p = f(s)$  jest bardzo miękka".

Poza różnicami własności w stosunku do silnika wirującego, wynikającymi z budowy silnika liniowego, istnieją jeszcze możliwości wpływu na zmianę charakterystyk silnika przez użytkownika. Producent dostarcza bowiem wyłącznie induktor. Użytkownik sam wykonuje bieźnik - może zatem ustalać jego wymiary i w ten sposób zmieniać charakterystyki silnika w szerokich granicach. Stąd też zachodzi potrzeba podania przez producenta zależności podstawowych charakterystyk silnika od parametrów bieźnika.

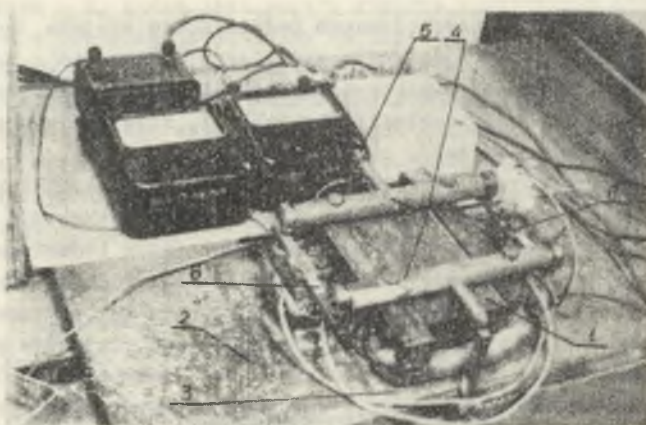
### 3. Cel i metoda badania

Związki między poszczególnymi wielkościami silnika liniowego można uzyskać na drodze analitycznej, jednak istnieje trudność w takim sformułowaniu związków obliczeniowych, które zapewniłoby dokładność całkowicie wystarczającą dla celów konstrukcyjnych. Zatem do określenia własności silnika i do porównania z obliczeniami zastosowano metodę pomiarową.

Przedmiotem badań modelowych był trójfazowy indukcyjny silnik liniowy jednostronny konstrukcji ZKMPW w Katowicach typu S1-5-25. Przeprowadzono badania przy zmianie napięcia zasilania oraz przy zmianach parametrów konstrukcyjnych bieźnika. Badania wpływu tych parametrów na podstawowe wielkości mechaniczne i elektryczne silnika (takie jak siła pociągowa, siła naciągu magnetycznego, prąd i moc pobierana itp.) miały na celu uzyskanie informacji przydatnych dla konstruktorów silników liniowych. Ponadto w od-



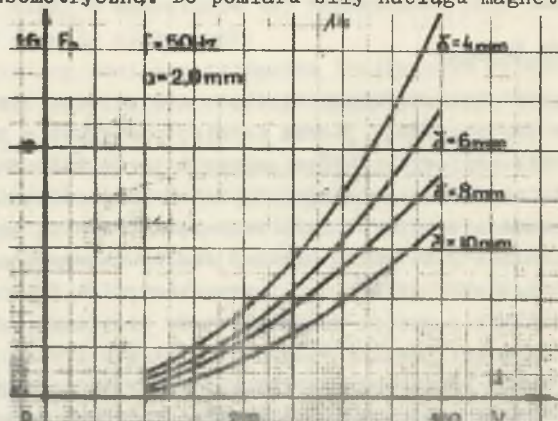
różnieniu od silnika indukcyjnego wirnika bieżnik silnika liniowego nie jest wykonywany przez wytwórcę silników, lecz stanowi część mechanizmu napędzanego i wymiary bieżnika mogą być w znacznym stopniu określone przez urządzenie napędzane. Dlatego przeprowadzone badania miały również na celu uzyskanie informacji przydatnych dla użytkownika.



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe silnika liniowego

1 - badany silnik, 2 - płyta ferromagnetyczna bieżnika, 3 - nakładka przewodząca bieżnika, 4 - uchwyty, 5 - czujnik do pomiaru siły pociągowej  $F_p$ , 6 - czujnik do pomiaru siły nacisku  $F_n$

Pomiary przeprowadzono utrzymując silnik w stanie zahamowanym. Silnik zasilano napięciem sinusoidalnym regulowanym. Mierzono ustalone wartości napięcia zasilania ( $U$ ), mocy ( $P$ ) i prądów pobieranych ( $I$ ) przez uzwojenia induktora. Siłę pociągową ( $F_p$ ) oraz siłę naciągu magnetycznego ( $F_n$ ) mierzono metodą tensometryczną. Do pomiaru siły naciągu magnetycznego zasto-

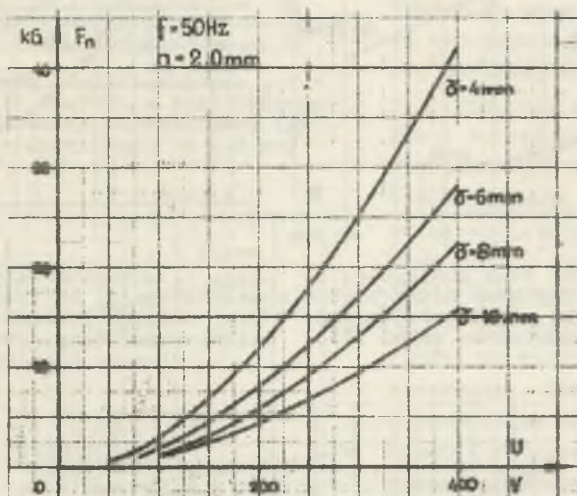


Rys. 4. Zależność siły pociągowej od napięcia zasilania przy różnych długościach (szczeliny (grubość nakładki aluminiowej  $a = 2\text{ mm}$ ))

sowano tensometryczne czujniki rezystancyjne umieszczone na czterech podporach induktora, połączone w układ mostka Wheatstona. Fotografiję stanowiącą pomiarowego przedstawiono na rys. 3. Pomiary przeprowadzono przy różnych wartościach szczeliny magnetycznej ( $\delta$ ) pomiędzy induktorem a częścią ferromagnetyczną bieźnika oraz przy różnych grubościach (a) i szerokościach (b) nakładki aluminiowej bieźnika. Grubość części ferromagnetycznej bieźnika w badanym modelu nie była zmieniana i wykonana była z płyty stalowej o grubości 35 mm.

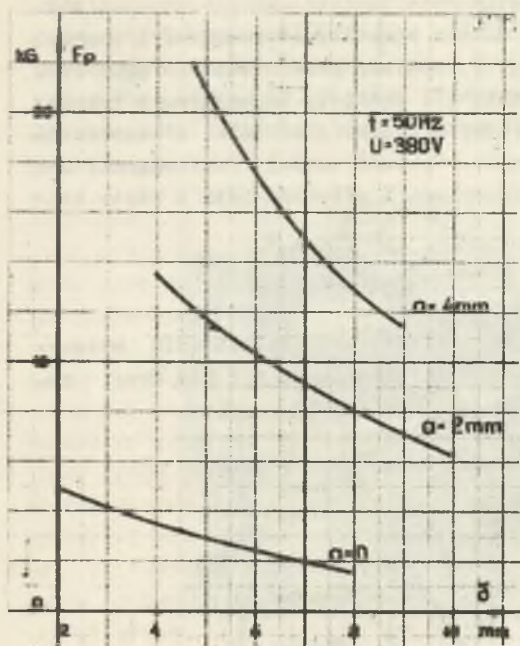
#### 4. Wyniki pomiarów i wnioski

Siła pociągowa i siła naciągu magnetycznego są w przybliżeniu proporcjonalne do napięcia zasilania w drugiej potęgze (rys. 4 i 5). Przy po-

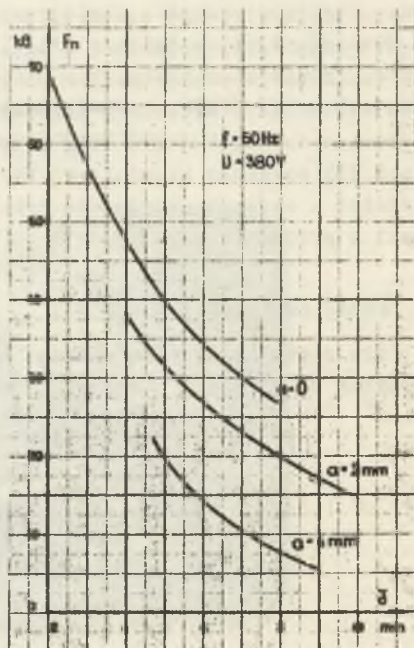


Rys. 5. Zależność siły naciągu magnetycznego od napięcia zasilania przy różnych długościach szczeliny (grubość nakładki aluminiowej  $a = 2$  mm)

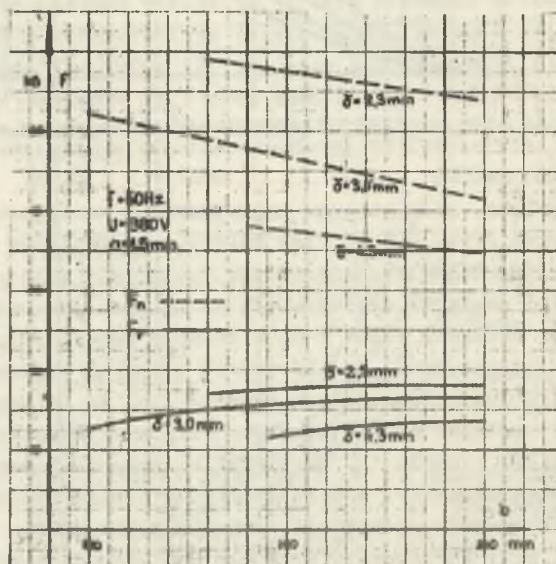
większeniu szczeliny, siła naciągu magnetycznego zmniejsza się znacznie niż siła pociągowa (rys. 6 i 7). Przy zwiększeniu grubości nakładki aluminiowej siła naciągu magnetycznego maleje, natomiast siła pociągowa przy wzroście grubości nakładki zwiększa się początkowo znacznie, a przy powiększaniu grubości nakładki ponad 4 mm w badanym modelu przyrost siły pociągowej nie jest już tak duży. Jeżeli jednak z innych względów zachodzi potrzeba stosowania dużych szczelin mechanicznych, to osiągnięcie dużych sił pociagowych jest możliwe przy stosunkowo dużych grubościach nakładki. Powiększenie nakładki o około 1/2 podziałki biegunowej ponad szerokość induktora powodowało w badanym modelu zwiększenie siły pociągowej o około 20%. Dalsze powiększanie szerokości nakładki praktycznie nie prowadziło do powiększenia siły pociągowej. Siła naciągu magnetycznego nieznacznie maleje przy powiększaniu szerokości nakładki (rys. 8).



Rys. 6. Zależność siły pociągowej od długości szczeliny przy różnych grubościach nakładki aluminiowej (napięcie zasilania, znamionowe  $u = 380\text{ V}$ ).

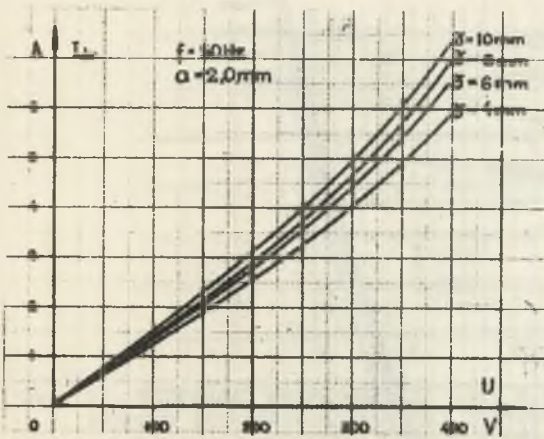


Rys. 7. Zależność siły naciągu magnetycznego od wartości szczeliny przy różnych grubościach nakładki aluminiowej (napięcie zasilania znamionowe  $u = 380\text{ V}$ ).

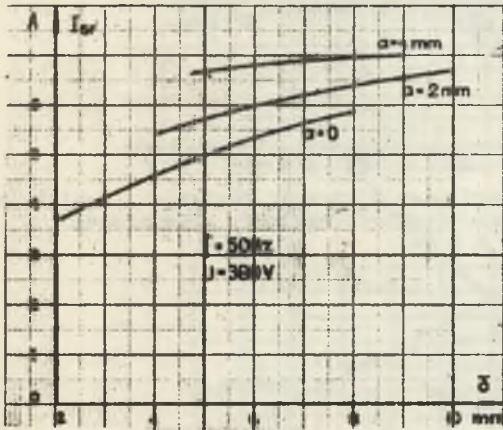


Rys. 8. Zależność siły naciągu magnetycznego i siły pociągowej od szerokości nakładki przewodzącej bieznika przy różnych długościach szczeliny (grubość nakładki aluminiowej  $\alpha = 1,5\text{ mm}$ , napięcie zasilania  $380\text{ V}$ ).





Rys. 9. Zależność średniego prądu induktora od napięcia zasilania przy różnych długościach szczeliny magnetycznej (grubość nakładki aluminiowej  $a = 2$  mm)

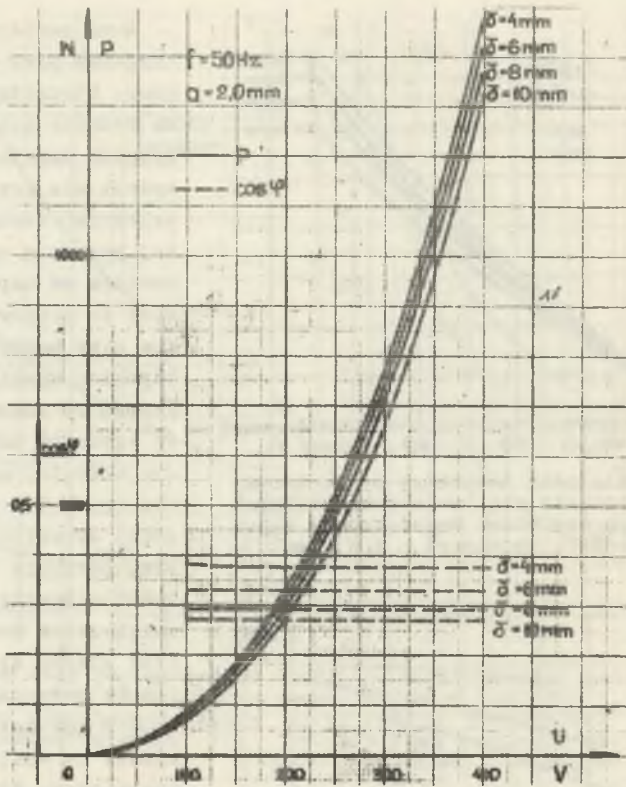


Rys. 10. Zależność średniego prądu od szczeliny magnetycznej przy różnych grubościach nakładki aluminiowej (napięcie zasilania znamionowe  $U = 380$  V)

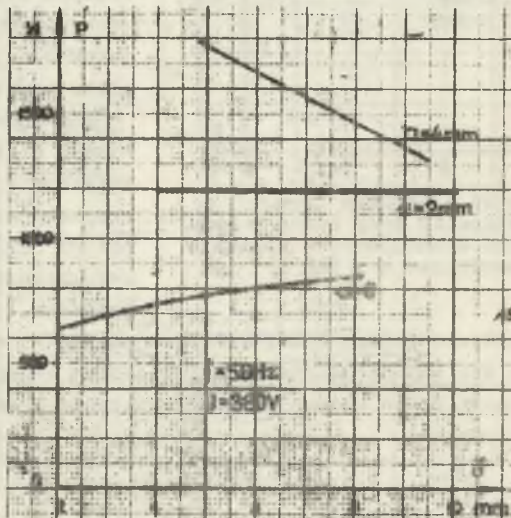
Prąd pobierany przez poszczególne fazy nie jest jednokowy. Stwierdzono pomiarowo, że różnice prądów w poszczególnych uzwojeniach badanego modelu nie przekraczały 20%. Zależność średniej arytmetycznej prądów w uzwojeniach induktora od napięcia jest zbliżona do proporcjonalnej, jedynie przy wartościach napięć bliskich znamionowych i większych od znamionowych, prąd ze wzrostem napięcia zwiększa się bardziej niż proporcjonalnie (rys. 9). Ze wzrostem długości szczeliny prąd zwiększa się, podobnie zwiększenie grubości nakładki prowadzi do zwiększenia prądu (rys. 10). Przy dużych długościach szczelin (w badanym modelu przy  $\delta > 10$  mm) wpływ grubości nakładki na wartość prądu jest nieznaczny. Stwierdzono również podczas pomiarów, że zwiększenie szerokości nakładki ponad szerokość pakietu blach induktora praktycznie nie zmieniło wartości prądu.

Moc czynna pobierana przez silnik w stanie zahamowanym zwiększa się w przybliżeniu proporcjonalnie do drugiej potęgi napięcia (rys. 11). Przy zwiększaniu szczeliny i braku nakładki, pobierana moc czynna

zwiększa się, natomiast przy dużej grubości nakładki (w badanym modelu  $a = 4$  mm) pobierana moc czynna maleje ze zwiększeniem szczeliny (rys. 12). Przy bardzo dużych szczelinach zmiana grubości nakładki praktycznie nie powoduje zmiany mocy pobranej.

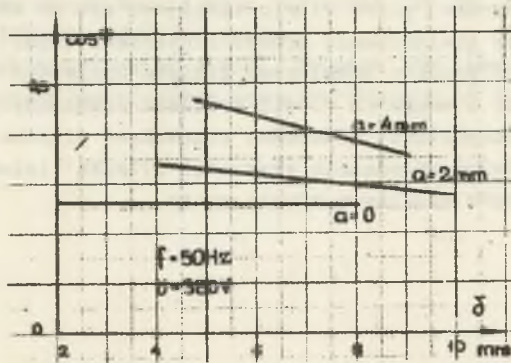


Rys. 11. Moc pobierana i współczynnik mocy w funkcji napięcia zasilania przy różnych długościach szczeliny (grubość nakładki aluminiowej  $a = 2\text{ mm}$ )

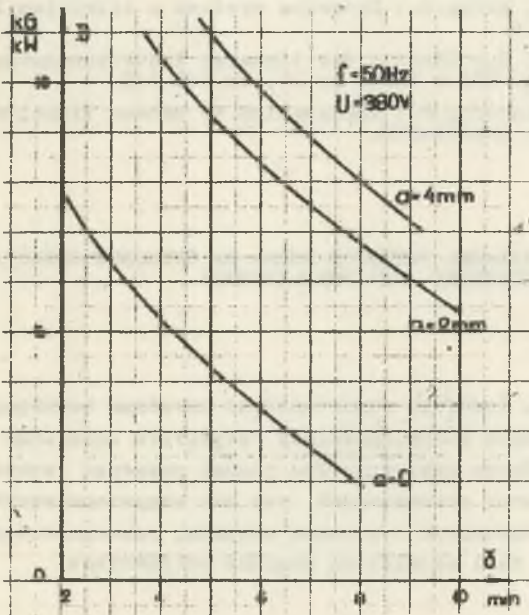


Rys. 12. Zależność mocy pobieranej od długości szczeliny magnetycznej przy różnych grubościach nakładki (napięcie zasilania  $U = 380\text{ V}$ )





Rys. 13. Zależność współczynnika mocy silnika od długości szczeliny przy różnych grubościach nakładki (napięcie zasilania znamionowe  $U = 380 \text{ V}$ )



Rys. 14. Dobroć silnika w funkcji długości szczeliny magnetycznej przy różnych grubościach nakładki aluminiowej (napięcie zasilania znamionowe  $U = 380 \text{ V}$ )

Współczynnik mocy silnika praktycznie nie zależy od napięcia zasilania a najbardziej jest uzależniony od grubości nakładki. W badanym modelu przy braku nakładki nie przekraczał 0,3 i malał ze wzrostem szczeliny (rys. 11 i 13).

Dobroć silnika liniowego określona jako stosunek siły pociągowej do czynnej mocy pobranej przez silnik zmniejsza się ze wzrostem szczeliny oraz wzrasta przy powiększaniu grubości nakładki (rys. 14).

Przedstawione pomiary modelowego silnika liniowego przeprowadzono w stanie zahamowanym. Z uwagi na rodzaj urządzeń napędzanych tym typem silnika (urządzenia transportowe) własności rozruchowe silnika decydują o jego przydatności. Pełne rozeznanie własności silnika liniowego wymaga uzupełniających pomiarów silnika w stanie ruchu.

#### LITERATURA

1. Budig P.K.: Aufbau, Wirkungsweise, Betriebsverhalten und Anwendungsmöglichkeiten von Linearmotoren. *Elektrie* 1970, nr 10, ss.335-340.
2. Laithwaite E.R.: Linear induction motor. *Proc.IEE.Part.A.* tom 104, 1957 ss.461-470.
3. Puchała A., Nitka S.: Dynamika systemu z silnikiem liniowym. SITG Katowice, 1969 r.
4. Poloujadoff M.: Theorie des linearen Induktionsmotor in vereinfachter Darstellung. *ETZ-A* 1969, nr 21, ss.545-548.
5. Remy E., Victorii M.: Application du moteur lineaire. *Rev.Gen.Electr.* 1969, nr 4, ss.362-370.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ЯКОРА НА ПУСКОВЫЕ СВОЙСТВА ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

#### Р е з ю м е

Рассмотрены свойства односторонних линейных электродвигателей в зависимости от размеров якоря. Приведены результаты модельных измерений индукционного линейного двигателя при разных размерах якоря. Подчеркнута целесообразность этих исследований, так как индукторы линейных двигателей часто работают совместно с разными якорями, размеры которых в значительной степени могут быть определены ведомым устройством.

#### INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE SECONDARY MEMBER GEOMETRY ON STARTING PROPERTIES OF THE LINEAR INDUCTION MOTOR

#### S u m m a r y

The linear 1-sided induction motor was the subject of the investigation. The results of the measurement of a model of the linear induction motor

are presented. The measurements were performed for two kinds of secondary part; with and without aluminium slab.

The results are practically useful, because the linear motors has often various secondary parts whose geometry depends of the driving system.